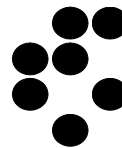


J. Stefan Institute, Ljubljana, Slovenia



DP-9675

Matematični model ločevalnika plina in vode

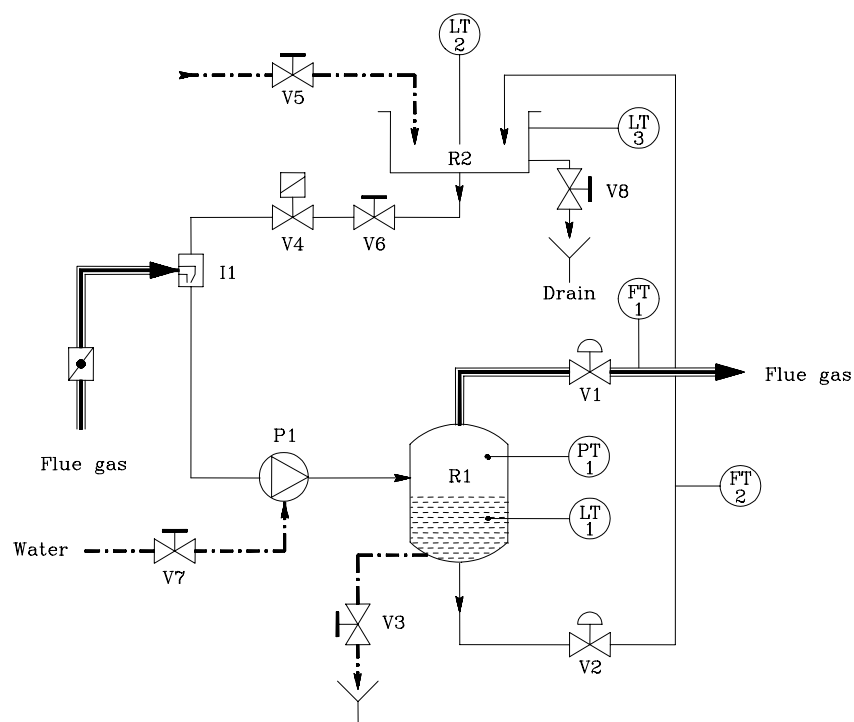
Satja Lumbar, Juš Kocijan

Februar 2006

1. OPIS PROCESA	3
1.1 SIGNALI	4
1.2 PRIKLOP, ZAGON TER ZAUSTAVITEV PROCESA	5
1.2.1 PRIKLOP	5
1.2.2 ZAGON PROCESA	7
1.2.3 ZAUSTAVITEV	9
2. NELINEARNI DINAMIČNI MODEL PROCESA	10
2.1 MODELA VENTILOV	10
2.1.1 VENTIL ZA ZRAK V_1	10
2.1.2 VENTIL ZA VODO V_2	12
2.2 PRETOK VODE IN ZRAKA SKOZI INJEKTOR	13
2.3 ZRAČNI TLAK V SEPARATORJU	15
2.4 NIVOJA VODE V SEPARATORJU IN REZERVOARJU	16
2.5 NELINEARNI MODEL	16
2.6 LINEARIZACIJA MODELA	18
2.6.1 IZPELJAVA IZ NELINEARNEGA MODELA	18
2.6.2 IZPELJAVA IZ MERITEV REALNE NAPRAVE	20
3. VALIDACIJA DINAMIČNEGA MODELA	22
3.1 VERIFIKACIJA STATIČNIH RAZMER	22
3.2 VALIDACIJA DINAMIČNIH RAZMER	33
4. ZAKLJUČEK	39
DADATEK A - TABELA KONSTANT	40
DODATEK B - MERITVE ZA MODEL VENTILA V_1	41
DODATEK C - MERITEV ZA MODEL VENTILA V_2	46
DODATEK D - MERITVE ZA MODEL PRETOKA ZRAKA TER VODE SKOZI INJEKTOR	47

1. Opis procesa

Ločevanje plina in vode je podproces v polindustrijski instalaciji, ki se v osnovi uporablja za redukcijo NO_x v tekočih plinih ter za nevtralizacijo odpadne vode, ki vsebuje CO_2 . Separacijska enota R_1 prejme tekočo vodo, ki vsebuje zgorele pline (npr. iz prejšnjega podprocesa) pod nizkim tlakom, ter jih pod poljubnim tlakom p_1 (seveda v mejah k jih določajo aktuatorji, črpalka ter varnostne razmere) prenese v naslednji podproces. Shema ločevalnika prikazuje slika 1.



Slika 1 Shema procesa

Zgoreli plini (v laboratoriju, kjer separator ni priključen na prejšnji podproces, te zgorele pline predstavlja zrak, ki se doda vodi skozi injektor I_1) se preko injektorja I_1 združijo z vodnim tokom, za katerega skrbi črpalka P_1 , katere hitrost vrtenja je možno spreminjati s frekvenčnim pretvornikom (Mitsubishi FR-E500) v električni omarici. Plin se v zaprti posodi R_1 loči od vode ter se nabira nad gladino vode, ter tako ustvarja pritisk, kar sili zrak skozi ventil V_1 v naslednji podproces (če ta obstaja), ter vodo skozi ventil V_2 nazaj v rezervoar R_2 . Količina vode v sistemu je torej konstanta. Če zaradi kateregakoli razloga potrebujemo več vode, jo lahko dotočimo skozi ventil V_5 , če pa je vode preveč jo odtočimo skozi ventil V_3 . Seznam komponent procesa je v tabeli 1:

Tabela 1 Seznam procesnih komponent

Simbol	Opis
R_1	Ločevalnik plina in vode
R_2	Odpri shranjevalnik (rezervoar)
I_1	Injektor plina
P_1	Električna črpalka
V_1	Ventil za zrak iz ločevalnika R_1
V_2	Ventila za vodo iz ločevalnika R_1
V_3	Ročni ventil za spuščanje vode iz ločevalnika R_1
V_4	Elektromagnetni ventil (odprt med obratovanjem)
V_5	Ročni ventil za dotekanje vode v rezervoar R_2
V_6	Ročni ventil s katerim nastavimo delovno točko črpalke P_1
V_7	Ročni ventil za dovajanje vode v črpalko P_1
V_8	Ročni ventil za spuščanje vode iz shranjevalnika R_2
PT_1	Merilnik tlaka v R_1
LT_1	Merilnik nivoja tekočine v R_1
LT_2	Merilnik nivoja tekočine v R_2
LT_3	ON/OFF senzor maksimalnega nivoja v R_2
FT_1	Merilnik pretoka plina
FT_2	Merilnik pretoka vode
	frekvenčni pretvornik

Seznam uporabljenih spremenljivk je v dodatku A.

1.1 Signali

Sledeči signali so dostopni v sistemu:

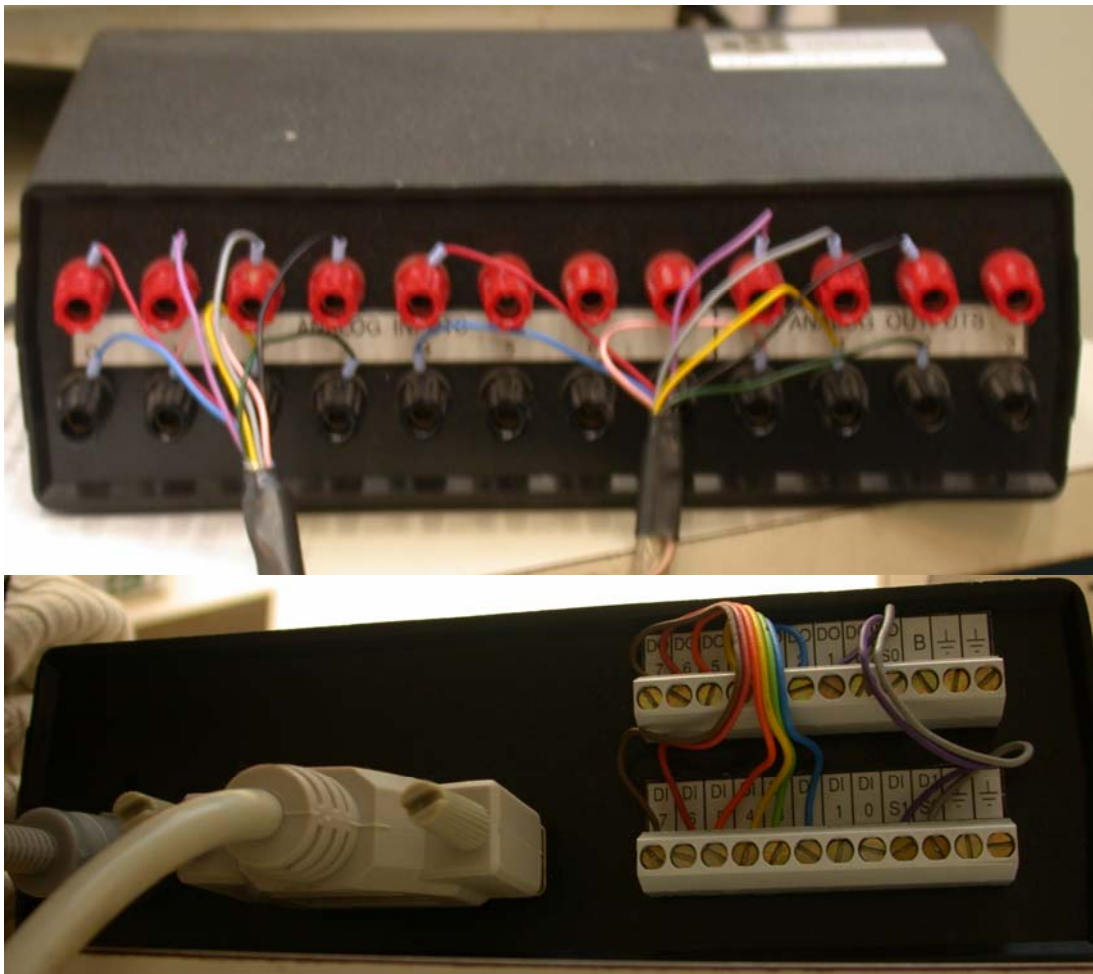
Tabela 2 Seznam merjenih signalov

Ime spremenljivke	Opis
h_1	nivo vode v R_1
h_2	nivo vode v R_2
-	ON/OFF senzor nivoja v R_2
p_1	tlak nad atmosferskim tlakom v R_1
Φ_1	pretok plina iz ločevalnika R_1
Φ_2	pretok vode iz ločevalnika R_1
u_1	komandni signal na zveznem ventilu V_1
u_2	komandni signal na zveznem ventilu V_2
f	frekvenca črpalke P_1

1.2 Priklop, zagon ter zaustavitev procesa

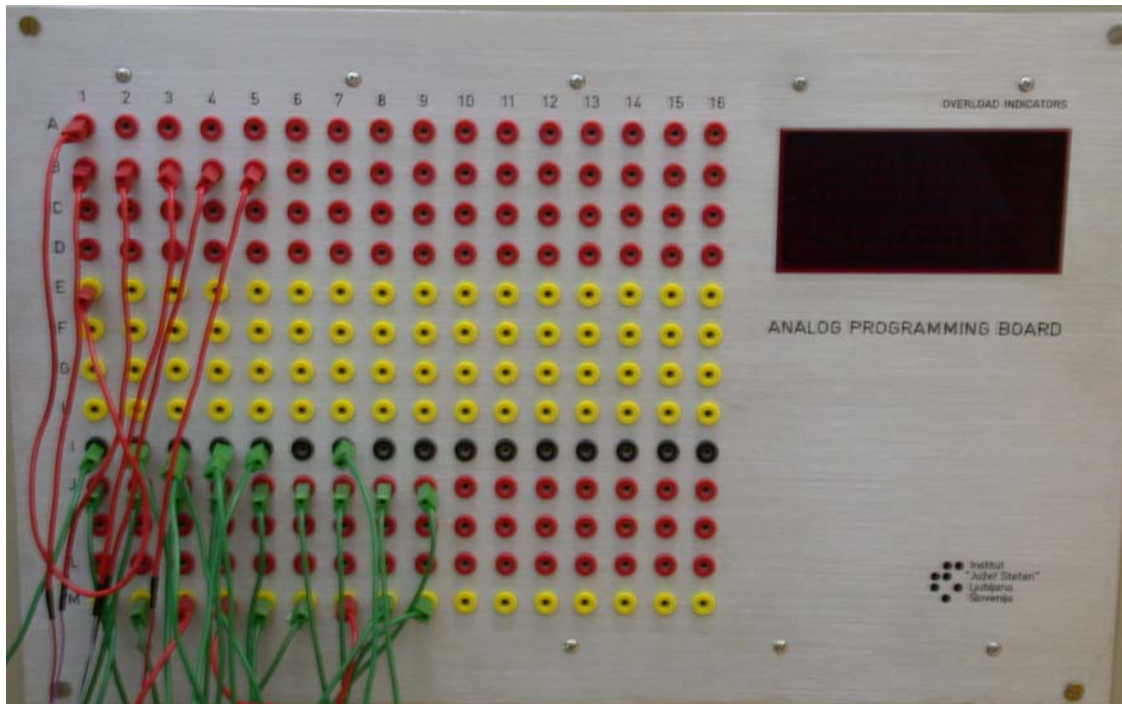
1.2.1 Priklop

Izmed treh možnih variant (PLK, Burr-Brown, DV2000) smo se odločili za vodenje procesa preko programskega paketa MATLAB Simulink z vhodno-izhodno enoto DV2000 (na sliki), ki se s PC-jem poveže preko paralelnega vhoda LPT1.



Slika 2 Vhodno izhodna enota DV2000

Na nadzorni omari je polje analognih vhodov in izhodov , ki jih povežemo z vhodno-izhodno enoto DV2000 kot prikazujeta slika 3 in tabela 3:



Slika 3 Analogni vhodi in izhodi na nadzorni plošči. Vrstica črne barve (I) je masa

Tabela 3 Vežalna tabela

Analogni vhod	Priključna sponka na komandnem pultu	Barva priključnega kabla	
$\Phi 1$	B1	rdeča/modra	kabel 1
$\Phi 2$	B2	viola/roza	
p1	B3	siva/rumena	
h1	B4	črna/zelena	
h2	B5	rdeča/modra	
Analogni izhod	Priključna sponka na komandnem pultu	Barva priključnega kabla	
u1	M3	viola/roza	kabel 2
u2	M4	siva/rumena	
f	M7	črna/zelena	

1.2.1.1 Nastavitve na PC-ju

Računalnik, na katerega povežemo vhodno-izhodno enoto DV2000 mora imeti nameščen programski paket MathWorks MATLAB 5.3 (R11) s Simulink-om. Priporočen je operacijski sistem MS Windows 2000. Sedaj je potrebno namestiti gonilnike za vhodno-izhodno enoto, za kar potrebujemo naslednje datoteke:

- DVADDA.dll
- dv2000.dll
- Giveio.sys

- inst.bat
- INSTDRV.EXE
- sc.exe
- uninst.bat
- demodv2k.mdl

Datoteke prekopiramo v poljubno mapo (npr "d:\Users\Satja\DV2000\driver"), ki jo nato nastavimo v MATLAB-ov "path". Sedaj le še zaženemo datoteko "inst.bat" in iz datoteke "demodv2k.mdl" lahko vzamemo MATLAB Simulink blok DV2000, ki predstavlja vhodno izhodno enoto.

1.2.2 Zagon procesa

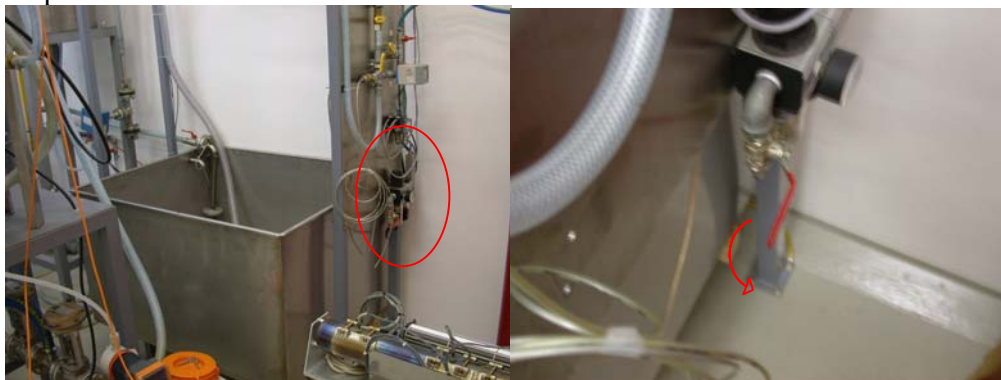
Proces zaženemo v naslednjih korakih:

- Vključimo nadzorno omaro (stikalo iz 0 na 1)
- Vključimo frekvenčni (stikalo iz 0 na 1)



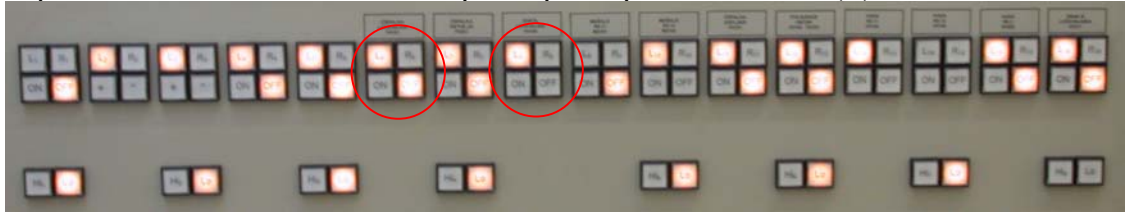
Slika 4 Omarica s frekvenčnim pretvornikom Mitsubishi FR-E500

- Odpremo dovod zraka



Slika 5 Sistem za dovajanje zraka pnevmatskima ventiloma V_1 in V_2

- Črpalko P_1 ter ventil V_4 na nadzorni plošči preklpimo na lokalno (L) in "ON"



Slika 6 Vkllop/Izklop črpalke ter elektronskega ventila V_4

- Odpremo dotok vode v črpalko (ravno toliko da teče)¹



Slika 7 Pipa za dotok vode v črpalko

- Ventil V_6 postavimo v srednji položaj (druga oznaka)
- Preverimo, ali so črpalka ter oba ventila nastavljeni na avtomatsko vodenje, če niso, jih v ta način prestavimo (stikalo iz M na A)



Slika 8 Stikala za preklp iz ročnega v avtomatsko delovanje

1.2.2.1 Vodenje procesa

Sedaj lahko v Simulink-u (npr. s pomočjo sheme "Separ.mdl", ali pa izdelamo svojo shemo) spreminjamo vhode (u_1 , u_2 ter f^2) ter opazujemo stanja ter izhode (p_1 , Φ_1 , Φ_2 , h_1 in h_2).

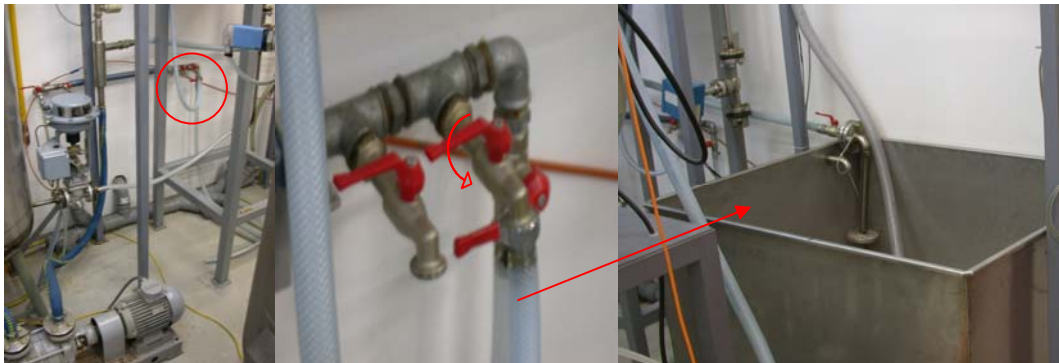
¹ Ko poženejo eksperiment je potrebno to vodo zapreti, v nasprotnem primeru dobimo nezaželeno lezenje nivoja v R_1 , ki nam kvari meritve

Med delovanjem je potrebno paziti, da se črpalka ne pregreva, ter da ne pride do preliva v shranjevalniku R_2 . Maksimalni nivo v R_2 zaznava ON/OFF senzor, ki nas na nevarnost preliva opozori s prižigom lučke na nadzorni plošči.



Slika 9 Svetlobni signal nas opozori na nevarnost prelitja v rezervoarju R_2

Če nivo vode v rezervoarju R_2 pade pod določeno mejo³, jo lahko dotočimo (ventil V_5), če pa je vode preveč in eksperimenta ne moremo oz. ne želimo zaustaviti (med samim eksperimentom je bolje vodo odtakati iz shranjevalnika R_2 , saj tako manj kritično vplivamo na stanja procesa), je potrebno cev iz pipe za dotekanje vode preusmeriti v odtok (tako višek vode iz R_2 sprti odteka).



Slika 10 Pipa za dotekanje vode v R_2 ; če pa je vode v R_2 preveč, cev odvijemo iz pipe in jo usmerimo v odtok

1.2.3 Zaustavitev

- Črpalko P_1 ter ventil V_4 na nadzorni plošči preklopimo na "OFF"
- Zapremo dovod zraka
- Izklopimo frekvenčnik
- Izklopimo nadzorno ploščo

² Frekvenco črpalke smo lahko spreminjamo med 0 in 60 Hz. Hitrosti pod 30 Hz zaradi pregrevanja niso priporočljive. Iz istega razloga pa moramo paziti pri hitrostih nad 55 Hz, da črpalka ni v takem načinu dlje kot približno pol ure

³ Približno 20 cm. Na tej višini je namreč tudi odtok iz rezervoarja. V primeru nižjih nivojev v R_2 črpalka goni »v prazno«

2. Nelinearni dinamični model procesa

2.1 Modela ventilov

Najprej smo poskušali modelirati zvezna ventila V_1 in V_2 . Karakteristiko zveznega ventila opisuje naslednja enačba:

$$\Phi = K\sqrt{\Delta p} \quad (1)$$

kjer simboli Φ , K in Δp predstavljajo pretok skozi ventil, koeficient pretoka ventila ter razliko med tlaki na obeh straneh ventila. Opravka imamo s proporcionalnimi ventili, pri katerih sta koeficient pretoka ter komandni signal na ventilu povezana po naslednji enačbi:

$$K = K_{\max} R^{v-1} \quad (2)$$

kjer simboli v , K_{\max} in R predstavljajo pozicijo ventila ($v=0$ pomeni popolnoma zaprt, $v=1$ pa popolnoma odprt ventil), koeficient K popolnoma odprtega ventila ter razmerje K_{\max}/K_{\min} .

Oba ventila poganjata servomotorja. Dejanski vhodni signal ventila je tokovni signal v območju 4..20 mA, ki se linearno pretvori v območje $u=0..1$. Ta signal je referenca za pozicijo ventila (v ustaljenem stanju $v=u$).

2.1.1 Ventil za zrak V_1

Statično karakteristiko ventila za zrak V_1 smo dobili tako, da smo pri različnih tlakih odčitali komandni signal ventila, ter izmerili pretok skozi ventil (Φ_1). Zatem smo izračunali koeficient ventila K_1 po enačbi:

$$K_1 = \frac{\Phi_1}{\sqrt{p_1}} \quad (3)$$

kjer p_1 predstavlja tlak nad atmosferskim tlakom p_0 ločevalniku R_1 . Rezultati so podani v tabeli 4:

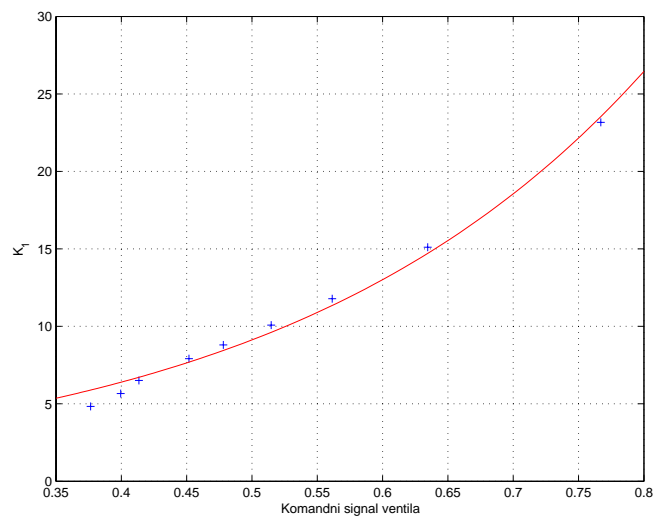
Tabela 4 Meritev na ventilu (u_I in Φ_1) ter izračunani koeficient ventila K_I

p_I [bar]	u_I [%]	Φ_1 [l/s]	K_I
0.9	0.3765	4.585	4.833
0.8	0.3995	5.063	5.661
0.7	0.4135	5.445	6.508
0.6	0.4518	6.128	7.911
0.5	0.4781	6.221	8.798
0.4	0.5147	6.375	10.080
0.3	0.5614	6.455	11.785
0.2	0.6345	6.757	15.109
0.1	0.7670	7.325	23.164

Z metodo najmanjših kvadratov (MATLAB-ova funkcija "fit.m") smo nato poiskali konstanti K_{max} in R , ter prišli do sledeče enačbe:

$$K_I = 53.79 \cdot 34.75^{u_I-1} \quad (4)$$

Rezultati so grafično prikazani na sliki 11.

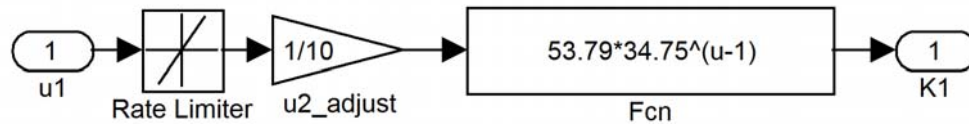


Slika 11 Meritve na ventilu V_1 ter aproksimacijska krivulja.

Statično karakteristiko ventila je potrebno razširiti z dinamičnim razmerjem med komandnim signalom u in dejanskim položajem ventila v . Zavedati se moramo namreč, da se pozicija ventila lahko spreminja le z omejeno hitrostjo:

$$\dot{v} = \begin{cases} \dot{v}_{\max}, & \dot{u} > \dot{v}_{\max} \\ \dot{v}_{\min}, & \dot{u} < \dot{v}_{\min} \\ \dot{u}, & \text{sicer} \end{cases} \quad (5)$$

kjer sta $\dot{v}_{\max} = 0.66s^{-1}$ in $\dot{v}_{\min} = -0.33s^{-1}$. MATLAB Simulink shema modela ventila V_1 je na sliki 12. Poteki vseh meritev so prikazani v dodatku B.



Slika 12 MATLAB Simulink shema ventila V_1 . Blok "u1_adjust" prilagodi napetostni signal 0-10 V v signal, ki ga potrebujemo, to je signal v območju 0...1

2.1.2 Ventil za vodo V_2

Statično karakteristiko ventila V_2 smo dobili iz meritev komandnega signala u_2 , pretoka skozi ventil Φ_2 ter nivoja v zaprti posodi h_1 pri konstantnem tlaku 0.95 bara. Koeficiente ventila smo nato izračunali s pomočjo enačbe (1):

$$K_2 = \frac{\Phi_2}{\sqrt{p_1 + K_W(h_1 - h_{R2})}}, \quad (6)$$

kjer $K_W=0.0981$ bar/m predstavlja proporcionalni faktor med nivojem v metrih ter tlakom v barih, $h_{R2}=2$ m pa višino rezervoarja R_2 . Rezultati so zbrani v tabeli 5:

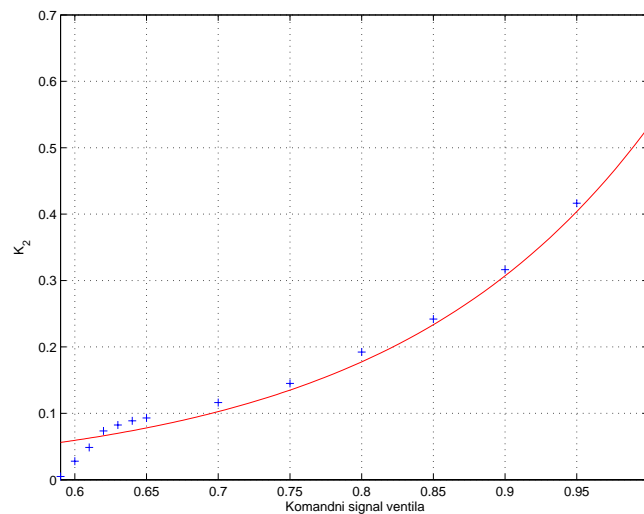
Tabela 5 Meritve na ventilu V_2 (Φ_2 in h_1) ter izračunani koeficient ventila K_2

u_2 [%]	Φ_2 [l/s]	h_1 [m]	K_2
1	0,40454	133,98	0.5112
0.95	0,33301	132,32	0.4164
0.9	0,25134	132,32	0.3164
0.85	0,19287	133,3	0.2419
0.8	0,15393	136,33	0.1922
0.75	0,11523	138,96	0.1450
0.7	0,092407	141,89	0.1162
0.65	0,074829	145,07	0.0931
0.64	0,071167	146,58	0.0887
0.63	0,065918	148,73	0.0825
0.62	0,058228	151,56	0.0735
0.61	0,035889	153,86	0.0486
0.6	0,020142	157,71	0.0280
0.59	0,0012207	160,54	0.0049

Krivulja, ki se je po metodi najmanjših kvadratov najbolj prilagala dobljenim meritvam ima enačbo:

$$K_2 = 0.5311 * 239.7^{u_2-1}. \quad (7)$$

Slika 13 prikazuje meritve ter najbolj prilagajočo se krivuljo.

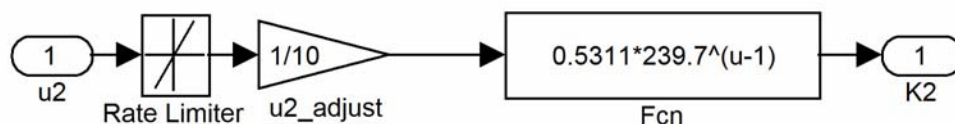


Slika 13 Meritve na ventilu V_2 (+), ter aproksimacijska krivulja (-)

Zopet je prisotno dinamično razmerje med komandnim signalom ventila ter dejansko pozicijo ventila:

$$\dot{v} = \begin{cases} \dot{v}_{\max} & , \quad \dot{u} > \dot{v}_{\max} \\ \dot{v}_{\min} & , \quad \dot{u} < \dot{v}_{\max} \\ \dot{u} & , \quad \text{sicer} \end{cases} \quad (8)$$

kjer sta $\dot{v}_{\max} = 0.66s^{-1}$ in $\dot{v}_{\min} = -0.33s^{-1}$. MATLAB Simulink shema modela ventila V_2 je na sliki 14. Meritev je prikazana v dodatku C.



Slika 14 MATLAB Simulink model ventila V_2 . Blok "u2_adjust" prilagodi napetostni signal 0-10 V v signal, ki ga potrebujemo, to je signal v območju 0...1

2.2 Pretok vode in zraka skozi injektor

Pretoka zraka ter vode skozi injektor ne moremo direktno meriti, zato ju je potrebno izračunati iz pretokov zraka ter vode na izhodu iz ločevalnika s pomočjo naslednjih enačb:

$$\Phi_w = \Phi_2 + \frac{S_1}{K_F} \cdot \frac{dh_1}{dt} \quad (9)$$

$$\Phi_{air} = \Phi_1 - \frac{p_0 + p_1}{p_0} \cdot \frac{S_1}{K_F} \cdot \frac{dh_1}{dt} \Big|_{p_1=konst.}, \quad (10)$$

kjer je K_F proporcionalni faktor med enotama m^3/s in l/s , S_1 pa je prečni presek separatorja. Vrednosti obeh pretokov pri štirih različnih hitrostih črpalke ter pri različnih tlakih so podane v tabeli 6.

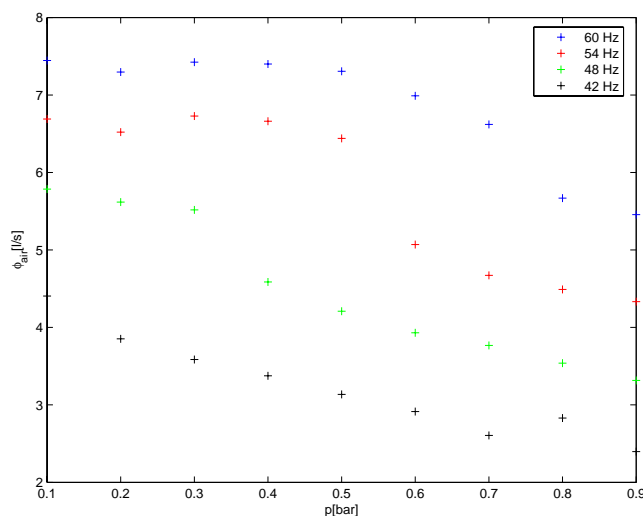
Tabela 6 Izračunana pretoka zraka ter vode v separator. Izmerjene vrednosti pretokov Φ_1 in Φ_2 so vidne na potekih meritev v dodatku D

f [Hz] / p1 [bar]		0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
60	Φ_w	0.2152	0.2152	0.2395	0.2387	0.1822	0.2384	0.2414	0.2292	0.2215
	Φ_{air}	5.4571	5.6690	6.6199	6.9894	7.3062	7.4002	7.4237	7.2963	7.4456
54	Φ_w	0.2206	0.2015	0.2153	0.2429	0.2109	0.2095	0.2245	0.2107	0.2199
	Φ_{air}	4.3331	4.4908	4.6722	5.0699	6.4399	6.6610	6.7284	6.5204	6.6904
48	Φ_w	0.2184	0.2125	0.2199	0.2050	0.2109	0.2145	0.2050	0.2073	0.2125
	Φ_{air}	3.3157	3.5382	3.7679	3.9312	4.2091	4.5868	5.5173	5.6180	5.7859
42	Φ_w	0.2248	0.2140	0.2186	0.2108	0.2199	0.2125	0.2153	0.2111	0.2276
	Φ_{air}	2.3973	2.830	2.6055	2.9143	3.1359	3.3758	3.5849	3.8526	4.4054

Iz rezultatov je jasno vidno, da pretok vode v ločevalnik ni odvisen (oz. je odvisnost zanemarljiva) niti od frekvence črpalke, niti od tlaka v zaprti posodi, zato smo ga v modelu upoštevali kot konstantno vrednost in sicer srednjo vrednost meritev:

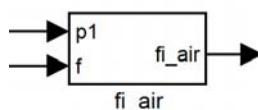
$$\Phi_w = 0.217 \text{ l/s}. \quad (11)$$

Vidimo torej, da frekvenca črpalke ne vpliva na količino vode, ki pride v ločevalnik, ima pa vpliv na vstopajoči zračni pretok. To karakteristiko prikazuje slika 15:



Slika 15 Izračunani pretoki zraka v separator pri različnih frekvencah črpalke in različnih tlakih

Takšno karakteristiko bi lahko modelirali s polinomom višjega reda s spremenljivimi koeficienti, vendar pa je mnogo bolj enostavno, če uporabimo primerjalno tabelo narejeno po tabeli 6 (lookup table), katere Simulink shemo prikazuje slika 16:



Slika 16 Pretok zraka smo modelirali s primerjalno tabelo

Vse meritve so grafično prikazane v dodatku D.

2.3 Zračni tlak v separatorju

Želimo dobiti še diferencialno enačbo za tlak v separatorju. Izhajamo iz enačbe za izotermično spremembo plina:

$$\frac{pV}{m} = rT = konst., \quad (12)$$

kjer je p absolutni tlak ($p_0 + p_1$), V je volumen plina, m pa masa plina v ločevalniku. Ker je odvod te enačbe po času enak 0, dobimo:

$$mV \frac{dp}{dt} = pV \frac{dm}{dt} - mp \frac{dV}{dt}. \quad (13)$$

Maso lahko izrazimo kot produkt gostote ρ ter volumna V :

$$m = \rho V. \quad (14)$$

Odvod mase plina je proporcionalen razliki med vhodnim in izhodnim pretokom zraka:

$$\frac{dm}{dt} = \rho_0 (\Phi_{air} - \Phi_1) K_F, \quad (15)$$

kjer je ρ_0 oznaka za normalno atmosfersko gostoto zraka. Če vstavimo enačbi (14) in (15) v enačbo (13), ter upoštevamo $p/p_0 = \rho/\rho_0$ ter $p = p_0 + p_1$, dobimo:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V} \left[p_0 (\Phi_{air} - \Phi_1) K_F + (p_0 + p_1) S_1 \frac{dh_1}{dt} \right]. \quad (16)$$

Prostornino plina v zaprti posodi izračunamo po naslednji enačbi:

$$V = S_1 (h_{R1} - h_1), \quad (17)$$

kjer je $h_{R1} = 2.25\text{m}$ višina zaprte posode.

2.4 Nivoja vode v separatorju in rezervoarju

Nivoja vode h_1 in h_2 smo modelirali s pomočjo naslednjih diferencialnih enačb:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{S_1} (\Phi_W - \Phi_2) K_F \quad (18)$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{S_2} (\Phi_2 - \Phi_W) K_F. \quad (19)$$

2.5 Nelinearni model

Sedaj še enkrat zapišimo enačbe, ki opisujejo nelinearni model:

Ventil V_1 :

$$K_1 = 53.79 \cdot 34.75^{u_1-1}$$

$$v_1 = \begin{cases} 1, & u_2 > 1 \\ 0, & u_2 < 0, \\ u_1, & \text{sicer} \end{cases} \quad (20)$$

Ventil V_2 :

$$K_2 = 0.5311 * 239.7^{v_2-1}$$

$$v_2 = \begin{cases} 1, & u_2 > 1 \\ 0, & u_2 < 0, \\ u_2, & \text{sicer} \end{cases} \quad (21)$$

Omejitev hitrosti odpiranja/zapiranja ventilov:

$$\dot{v} = \begin{cases} 0.66s^{-1}, & \dot{u} > \dot{v}_{\max} \\ -0.33s^{-1}, & \dot{u} < \dot{v}_{\max}, \\ \dot{u}, & \text{sicer} \end{cases} \quad (22)$$

Zračni pretok skozi V_1 :

$$\Phi_1 = K_1 \sqrt{p_1}, \quad (23)$$

Pretok vode skozi V_2 :

$$\Phi_2 = K_2 \sqrt{p_1 + K_W (h_1 - h_{R2})}, \quad (24)$$

Pritok vode v separator:

$$\Phi_W = 0.217 \text{ } /_s, \quad (25)$$

Pritok zraka v separator: Primerjalna tabela po tabeli 6,

Sprememba nivoja v R_1 :

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{1}{S_1} (\Phi_W - \Phi_2) K_F, \quad (26)$$

Sprememba nivoja v R_2 :

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1}{S_2} (\Phi_2 - \Phi_W) K_F, \quad (27)$$

Sprememba tlaka v R_1 :

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V} \left[p_0 (\Phi_{air} - \Phi_1) K_F + (p_0 + p_1) S_1 \frac{dh_1}{dt} \right], \quad (28)$$

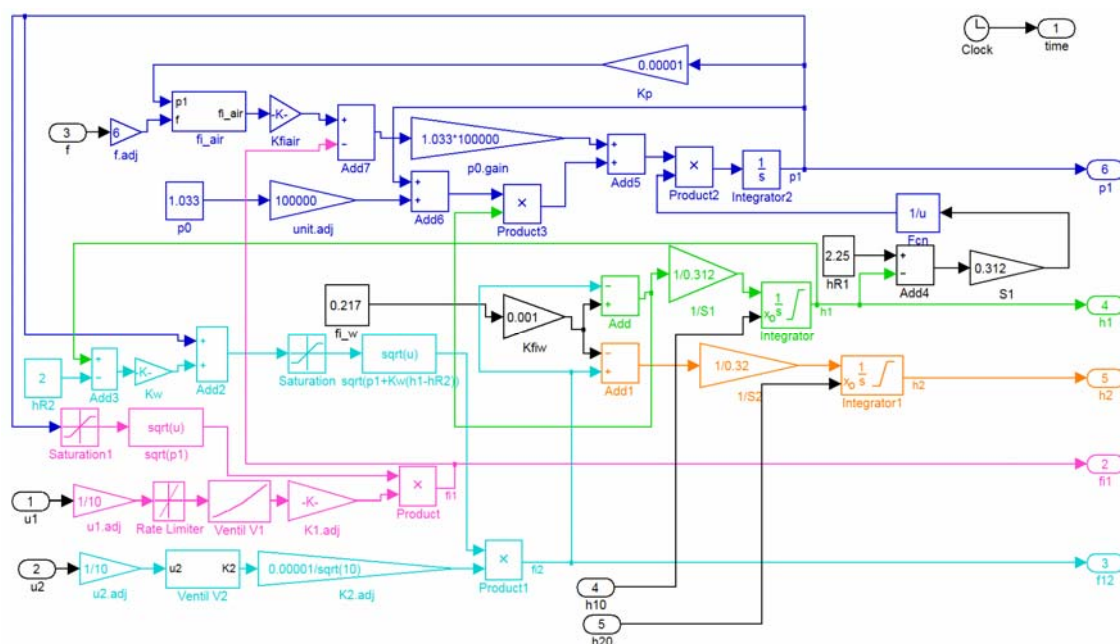
Volumen zraka v R_1 :

$$V = S_1(h_{R1} - h_1), \quad (29)$$

Prečna preseka posod R_1 in R_2 :

$$\begin{aligned} S_1 &= 0.312m^2 \\ S_2 &= 0.32m^2 \end{aligned} \quad (30)$$

MATLAB Simulink shemo nelinearnega modela prikazuje slika 17:



Slika 17 Nelinearni model separatorja zgrajen s programskim paketom MATLAB Simulink

2.6 Linearizacija modela

Linearizacijo modela opravimo le pri eni frekvenci, v našem primeru pri $f=54$ Hz. Pridobivanje linearnega modela pri drugih frekvencah se razlikuje le v drugačnem pritoku zraka v separator.

2.6.1 Izpeljava iz nelinearnega modela

Lokalizirani linearni modeli so pridobljeni z identifikacijo s pomočjo pomožnih spremenljivk (MATLAB-ova funkcija `iv4.m`). Diskretni linearni model za vsak ustaljen nivo v posodi R_1 dobimo tako, da izvedemo identifikacijo s pomožnimi spremenljivkami na vhodno/izhodnih podatkih nelinearnega modela. Če identificiramo model prvega reda, dobimo za vsak nivo enačbo oblike:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (31)$$

kjer sta $A(q)$ in $B(q)$ polinoma prvega reda oblike:

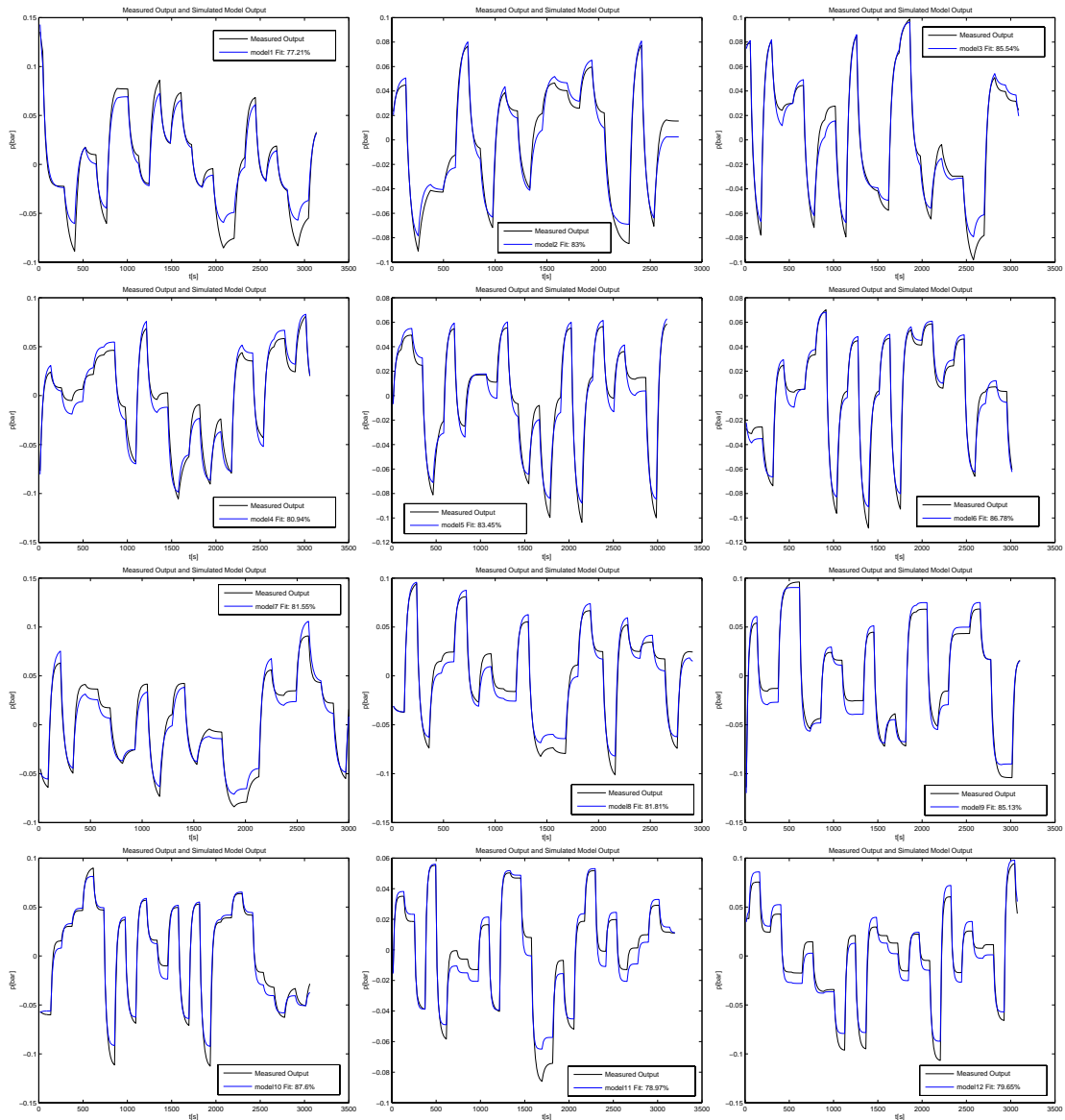
$$\begin{aligned} A(q) &= 1 - a_1 q^{-1} \\ B(q) &= -b_1 q^{-1} \end{aligned}, \quad (32)$$

ki imata različne parametre a_1 in b_1 za različne nivoje vode v R_I . Vrednosti teh parametrov so podane v tabeli 7:

Tabela 7 Parametra a_1 in b_1 za lokalne linearizirane modele pri različnih nivojih vode v R_I

h1 [m]	a_1	b_1
0.4	-0,66077	-0,042048
0.5	-0,64621	-0,053739
0.6	-0,64557	-0,053395
0.7	-0,59261	-0,065547
0.8	-0,5901	-0,061774
0.9	-0,54143	-0,066668
1	-0,58981	-0,069207
1.1	-0,51436	-0,07464
1.2	-0,45558	-0,086499
1.3	-0,44956	-0,081708
1.4	-0,36377	-0,086309
1.5	-0,37681	-0,098958

Primerjava odzivov nelinearnega modela in lokalnih lineariziranih modelov je prikazana na sliki 18:



Slika 18 Od leve proti desni in od zgoraj navzdol: $h_l=0.4$ m, $h_l=0.5$ m, $h_l=0.6$ m, $h_l=0.7$ m, $h_l=0.8$ m, $h_l=0.9$ m, $h_l=1$ m, $h_l=1.1$ m, $h_l=1.2$ m, $h_l=1.3$ m, $h_l=1.4$ m, $h_l=1.5$ m

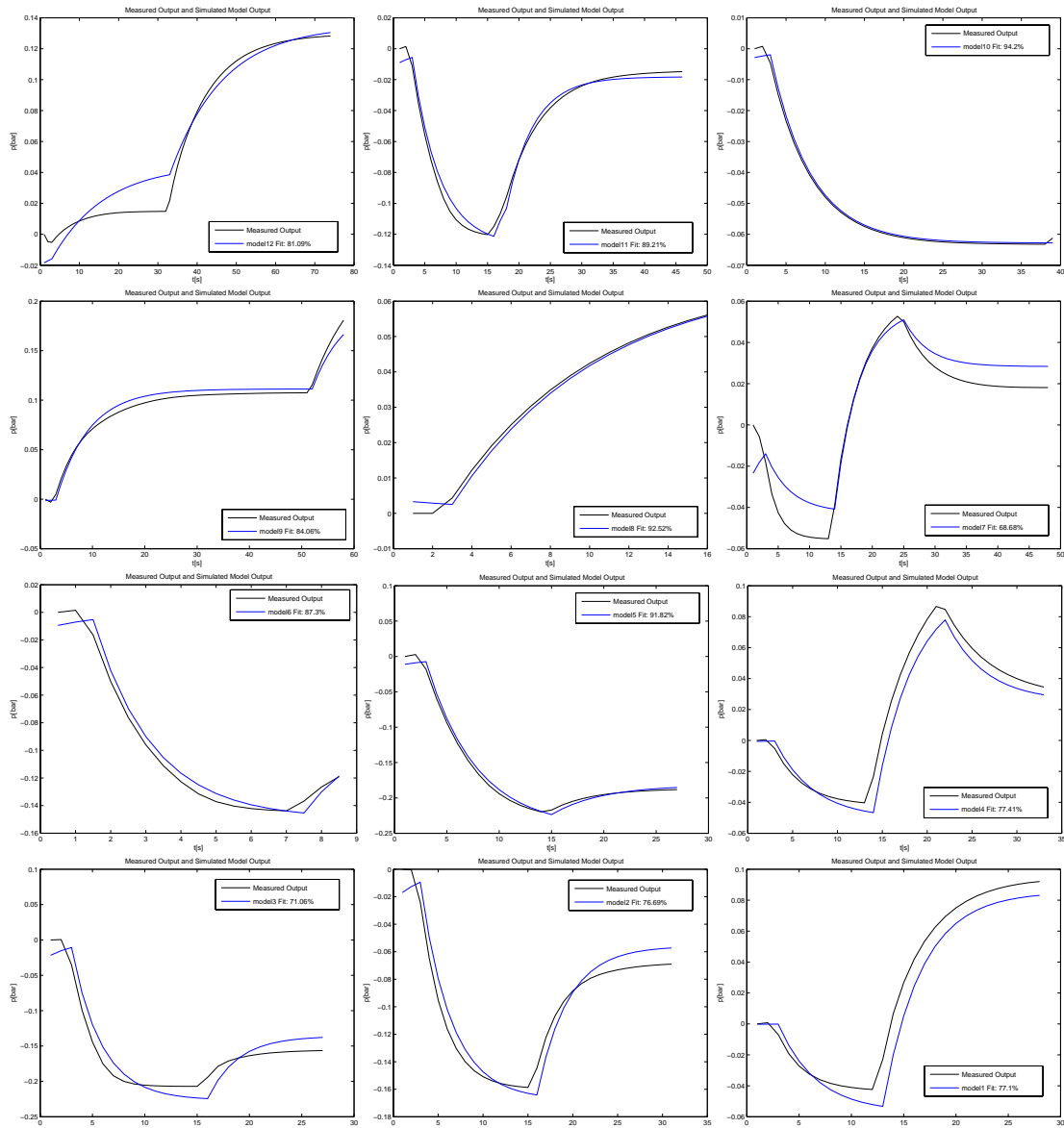
2.6.2 Izpeljava iz meritev realne naprave

Tokrat smo diskretne modele poskušali identificirati iz vhodov ter izhodov realne naprave. Parametra a_l in b_l za posamezne lokalizirane modele sta podana v tabeli 8:

Tabela 8 Parametra a_j in b_j za lokalne linearizirane modele pri različnih nivojih vode v R_j

h_l [m]	a_j	b_j
0.4	-0,92814	-0,16171
0.5	-0,79315	-0,37627
0.6	-0,82222	-0,37239
0.7	-0,8517	-0,33007
0.8	-0,87551	-0,4186
0.9	-0,77221	-0,32251
1	-0,7444	-0,54611
1.1	-0,81056	-0,57424
1.2	-0,79407	-0,52158
1.3	-0,70318	-0,67263
1.4	-0,74594	-0,70997
1.5	-0,76074	-0,68133

Primerjava odzivov realne naprave in lokalnih lineariziranih modelov je prikazana na sliki 19:



Slika 19 Od leve proti desni in od zgoraj navzdol: $h_I=0.4$ m, $h_I=0.5$ m, $h_I=0.6$ m, $h_I=0.7$ m, $h_I=0.8$ m, $h_I=0.9$ m, $h_I=1$ m, $h_I=1.1$ m, $h_I=1.2$ m, $h_I=1.3$ m, $h_I=1.4$ m, $h_I=1.5$ m

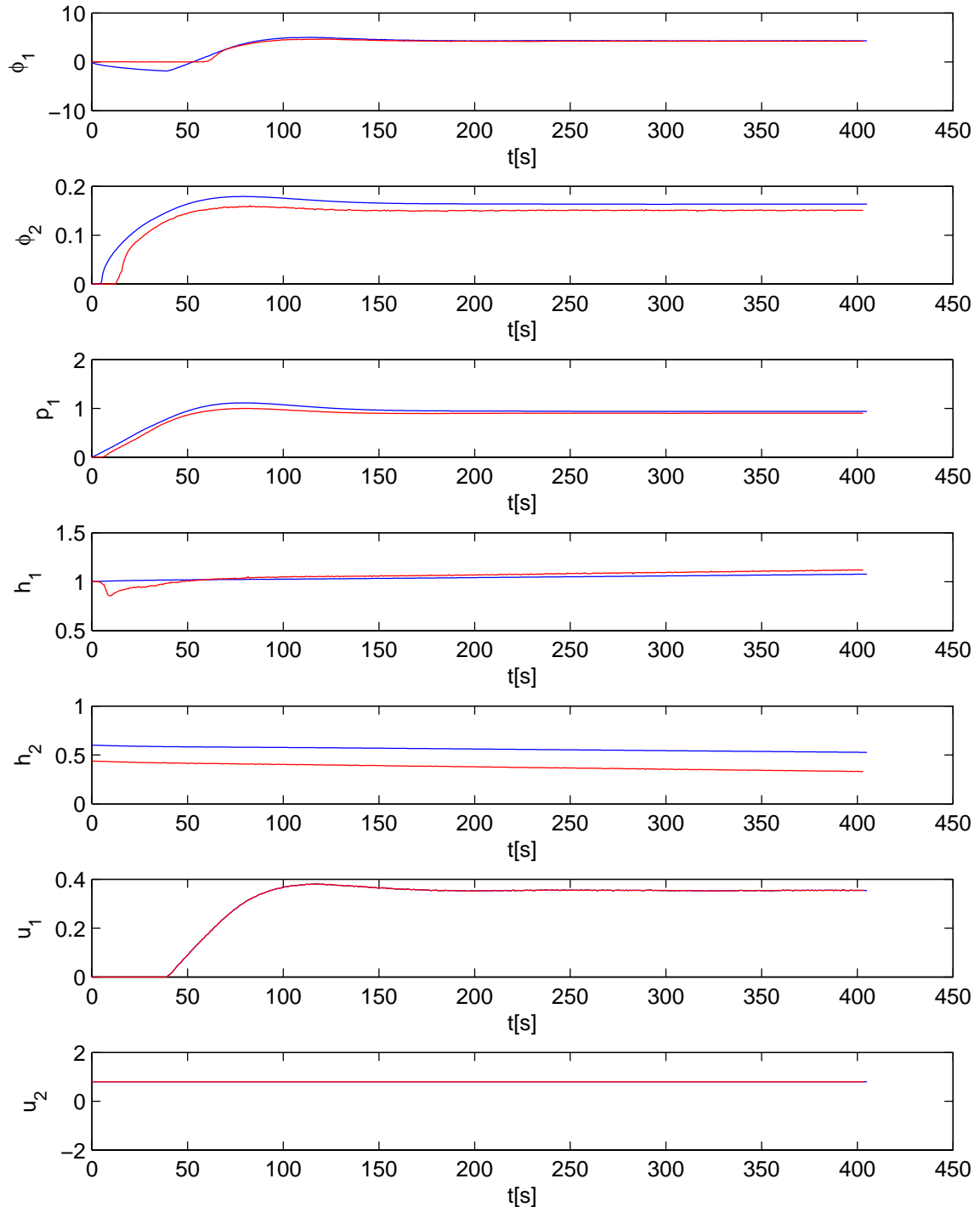
3. Validacija dinamičnega modela

3.1 Verifikacija statičnih razmer

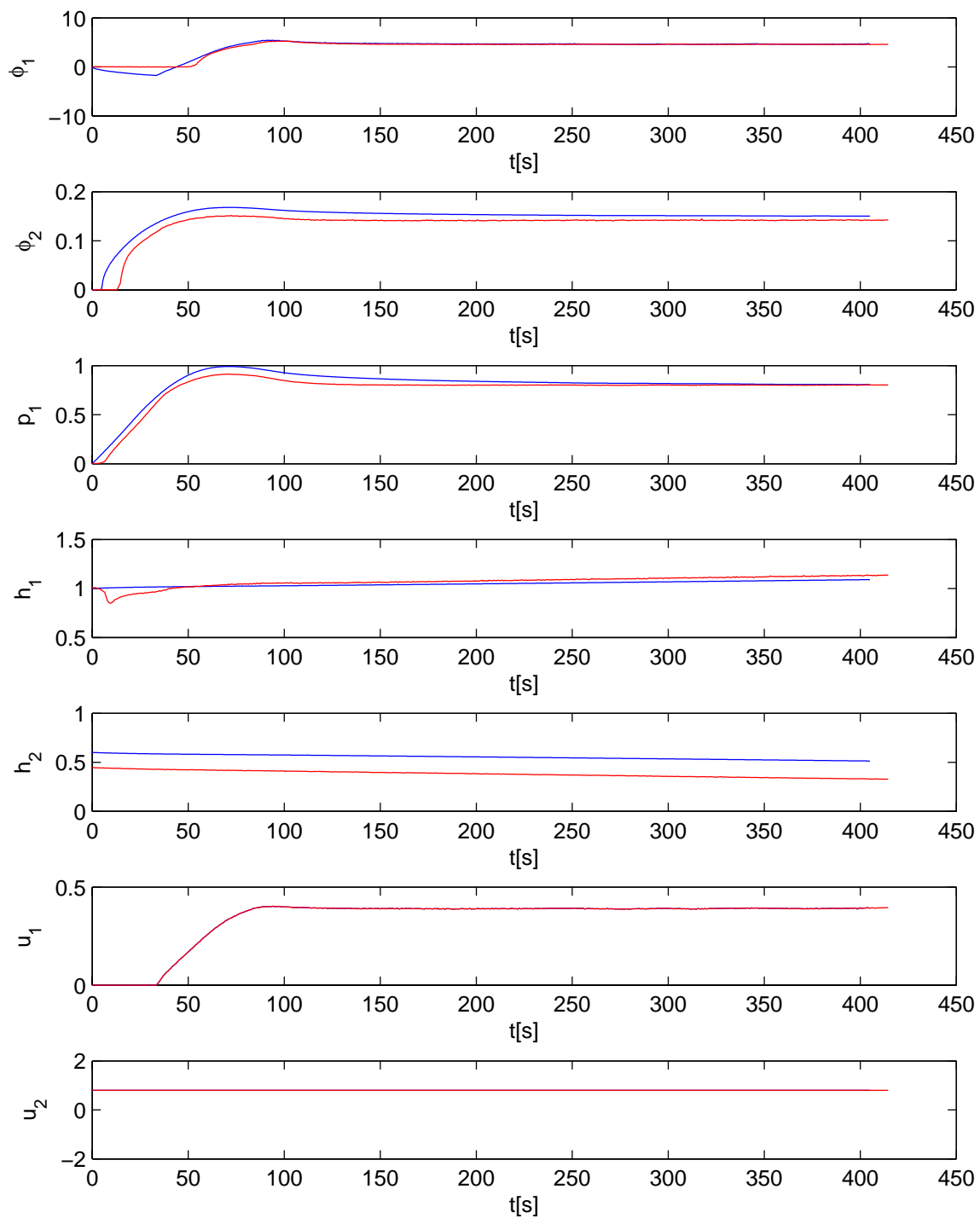
Najprej je bilo treba preveriti statične razmere. Gre za odprtozančni preizkus, kjer v modelu uporabimo enaka komandna signala za ventila⁴ kot smo ju uporabili pri regulaciji

⁴ Frekvenca na črpalki je $f = 54$ Hz

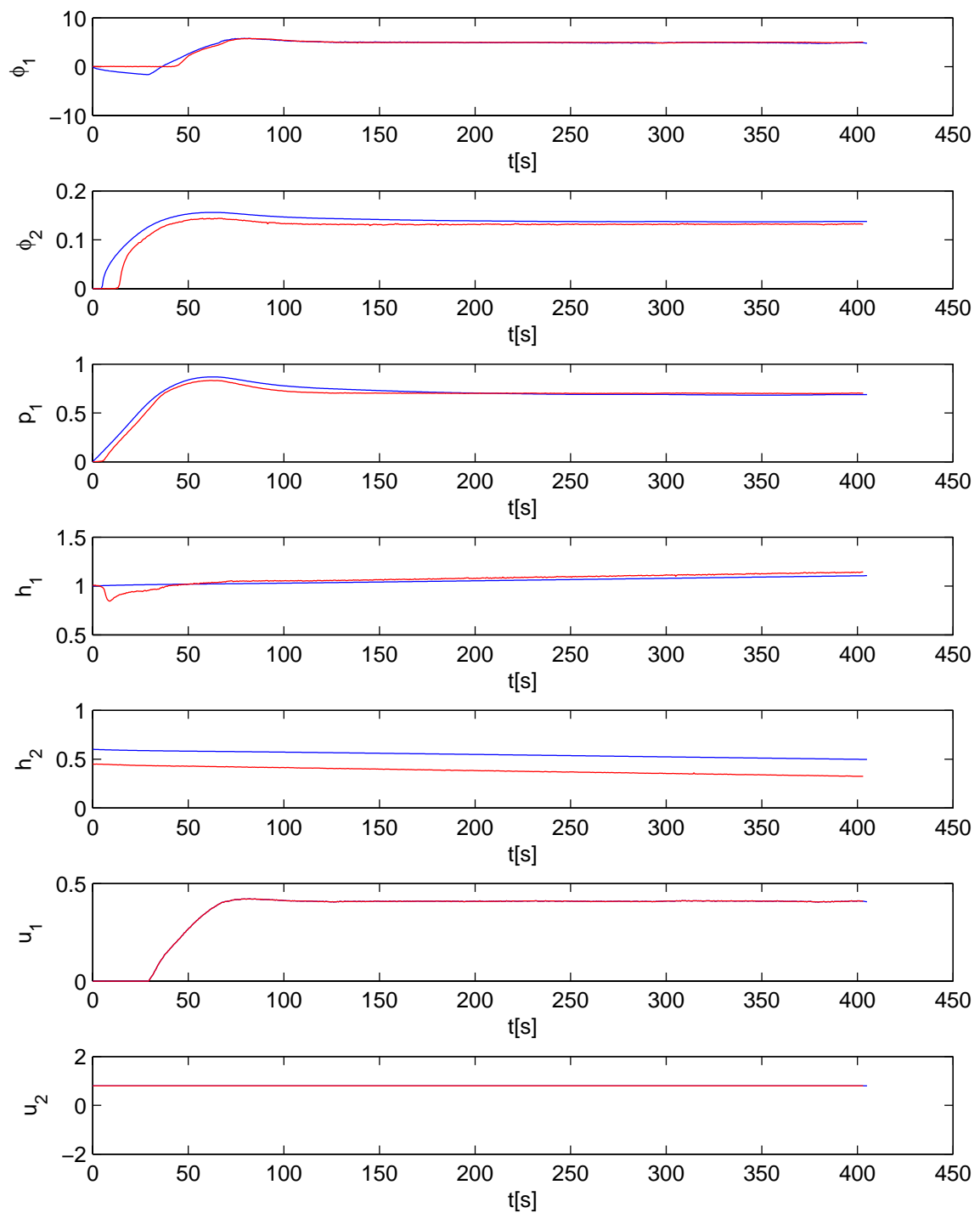
tlaka v realnem procesu, ter primerjamo veličine v modelu in procesu. Rezultate vidimo na slikah 18 do 26:



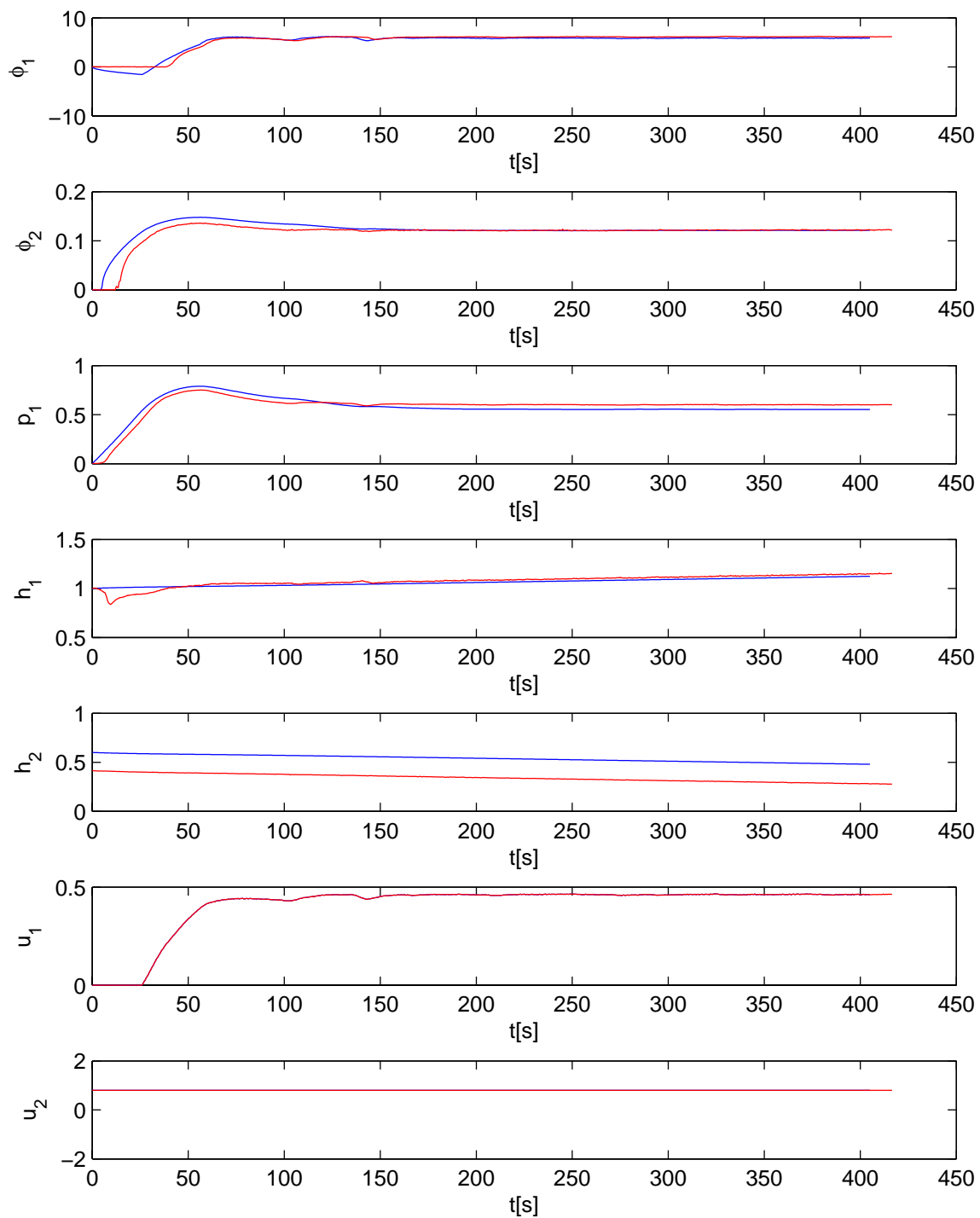
Slika 20 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



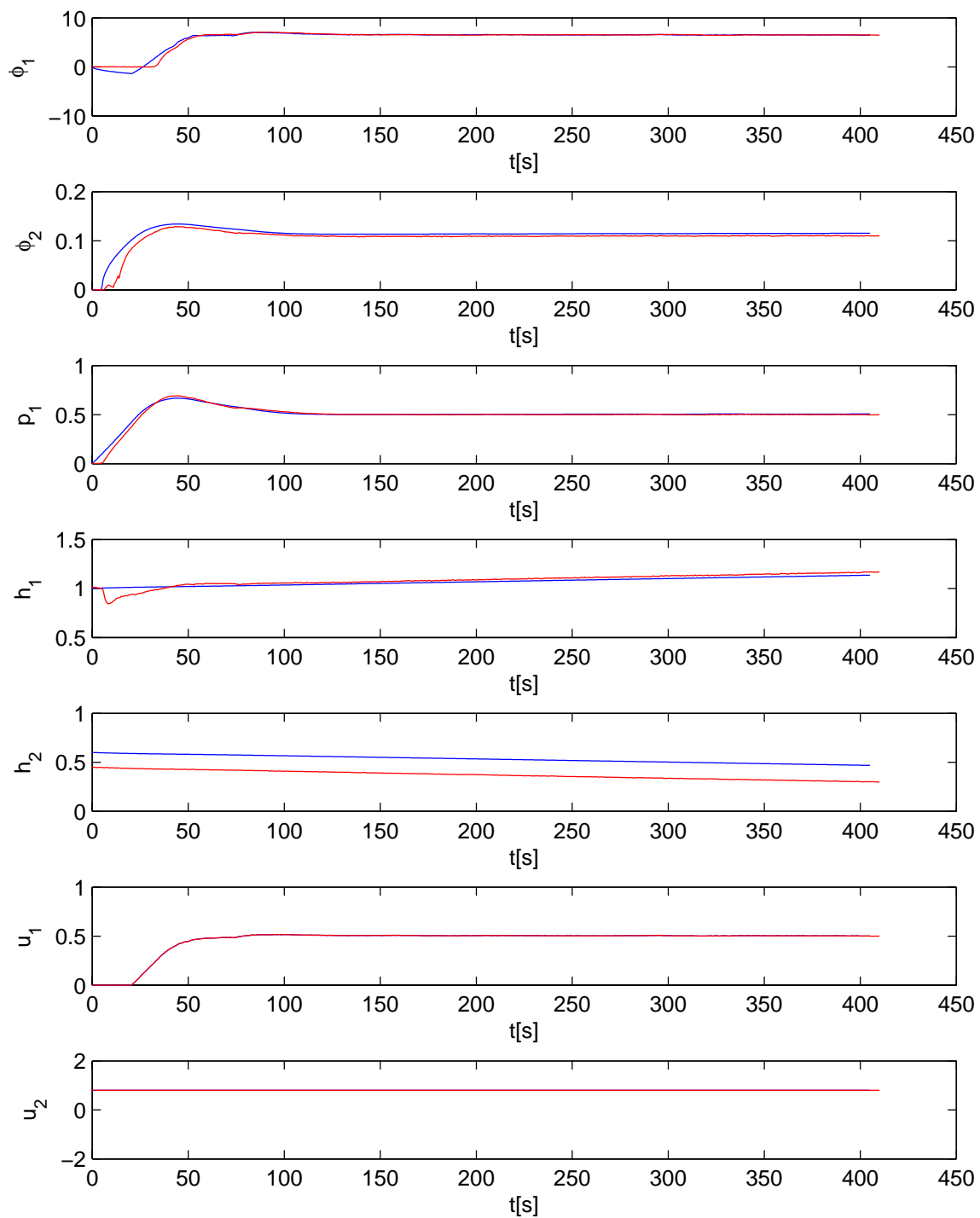
Slika 21 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



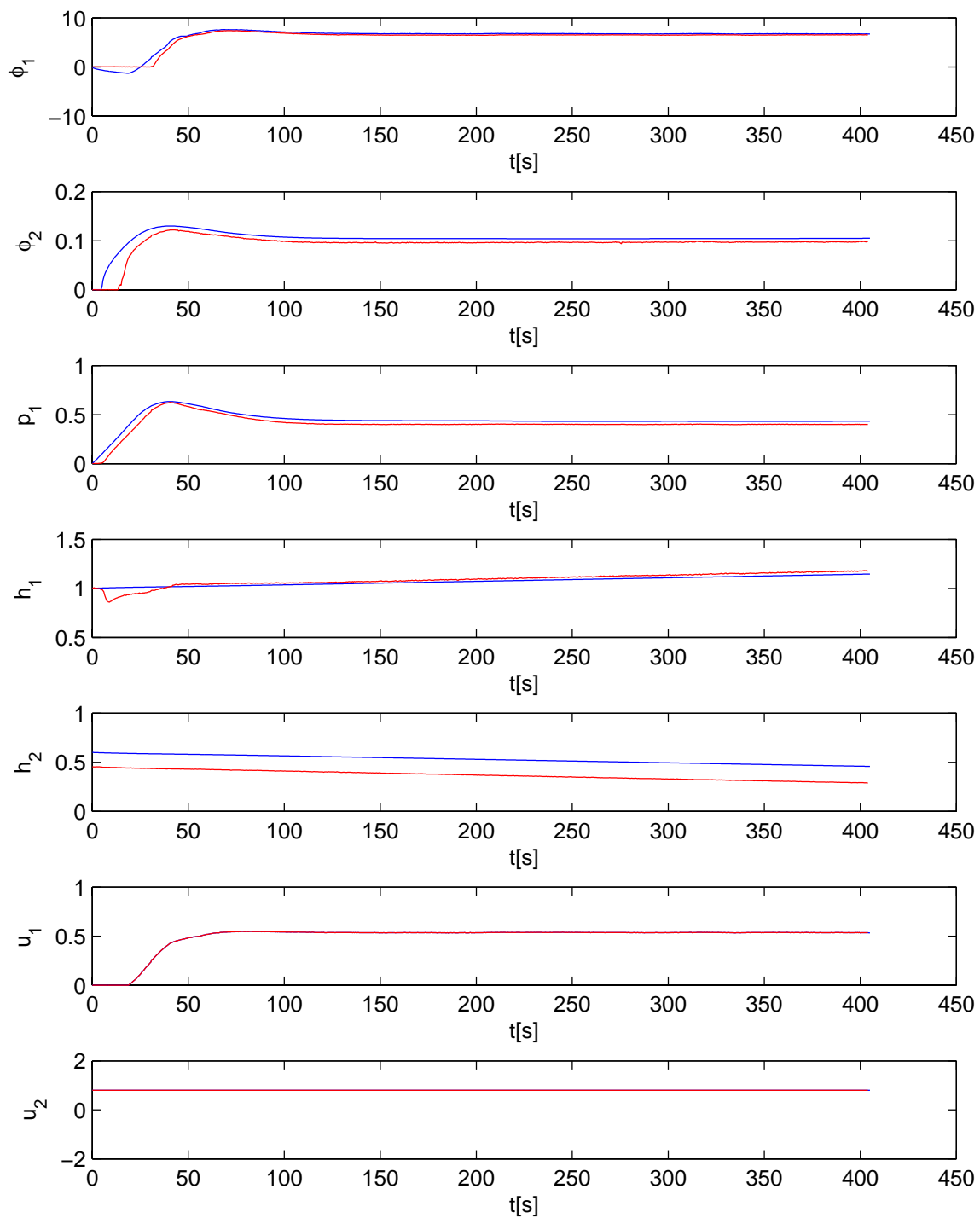
Slika 22 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



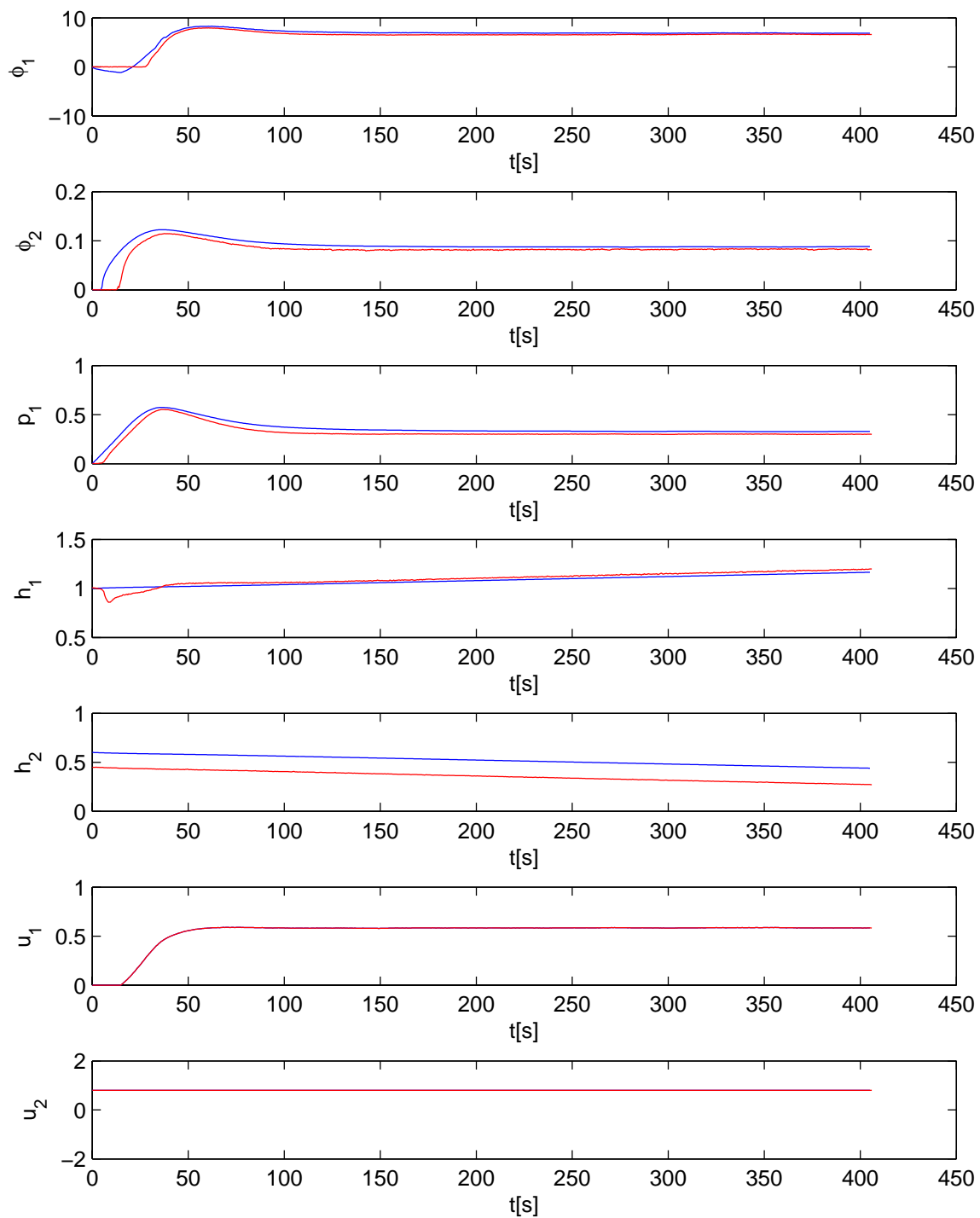
Slika 23 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



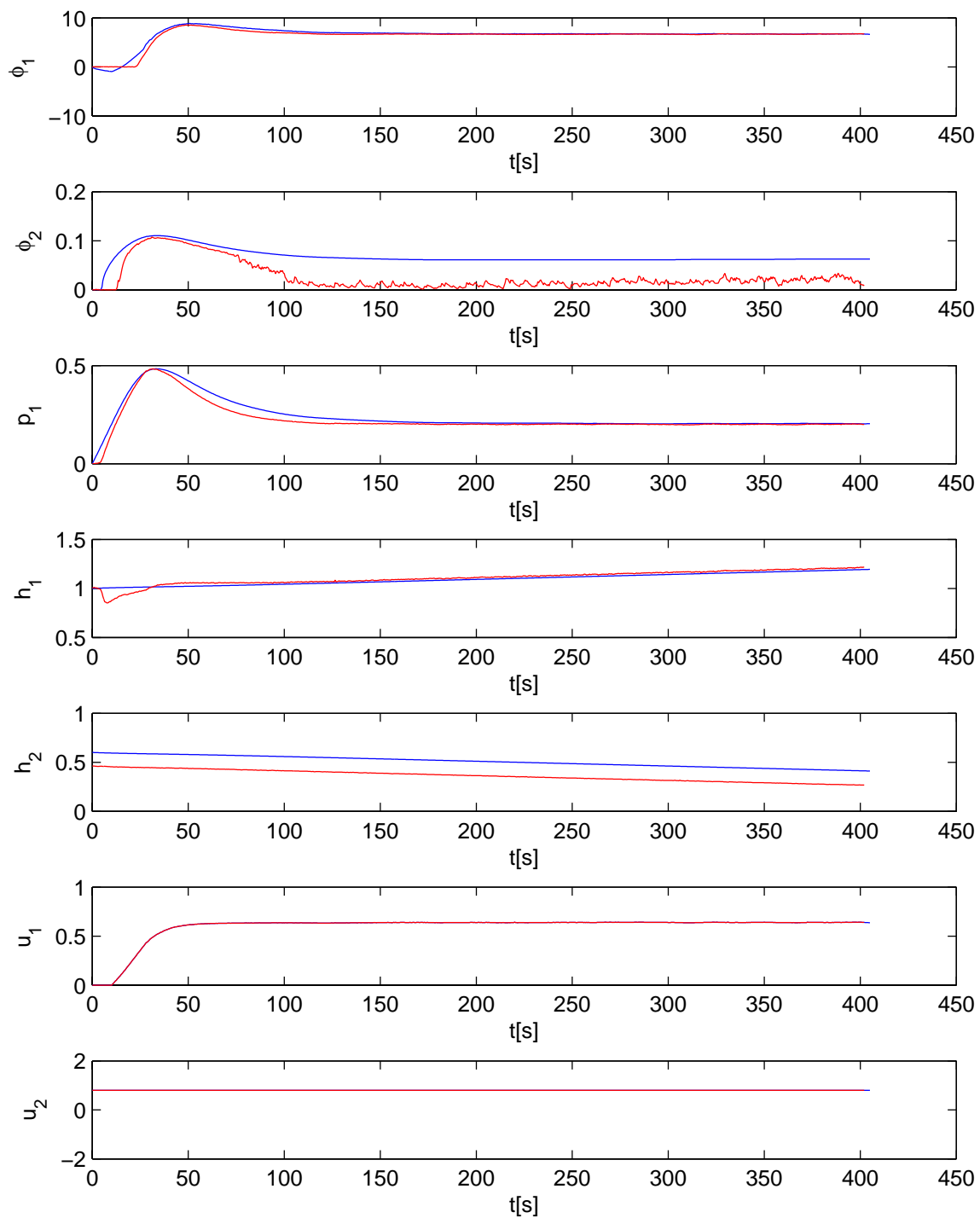
Slika 24 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



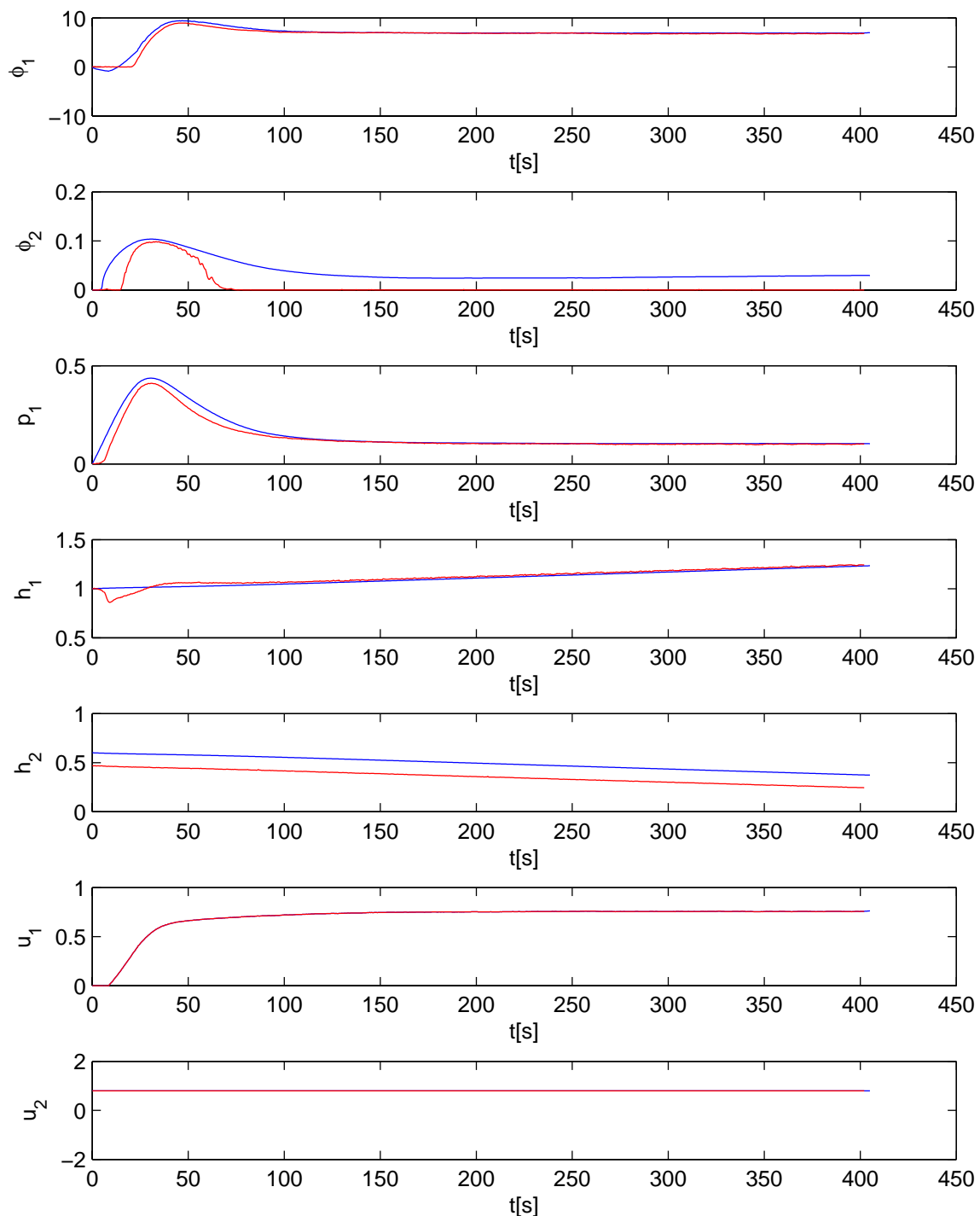
Slika 25 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



Slika 26 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



Slika 27 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



Slika 28 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela

Opazimo lahko nenavaden prehodni pojav pri poteku nivoja vode (h_1) v ločevalniku. Ta pojav je verjetno posledica zračnega mehurčka v cevi negativne sponke merilnika nivoja v R_1 . Ko zaženemo proces se mehurček najprej močno skrči, kar rezultira v napačnem

kazanju nivoja. Ko prehodni pojav mine (tlak se ustali), mehurček več ne vpliva na merilnik nivoja, zato le ta deluje pravilno v ustaljenem stanju.

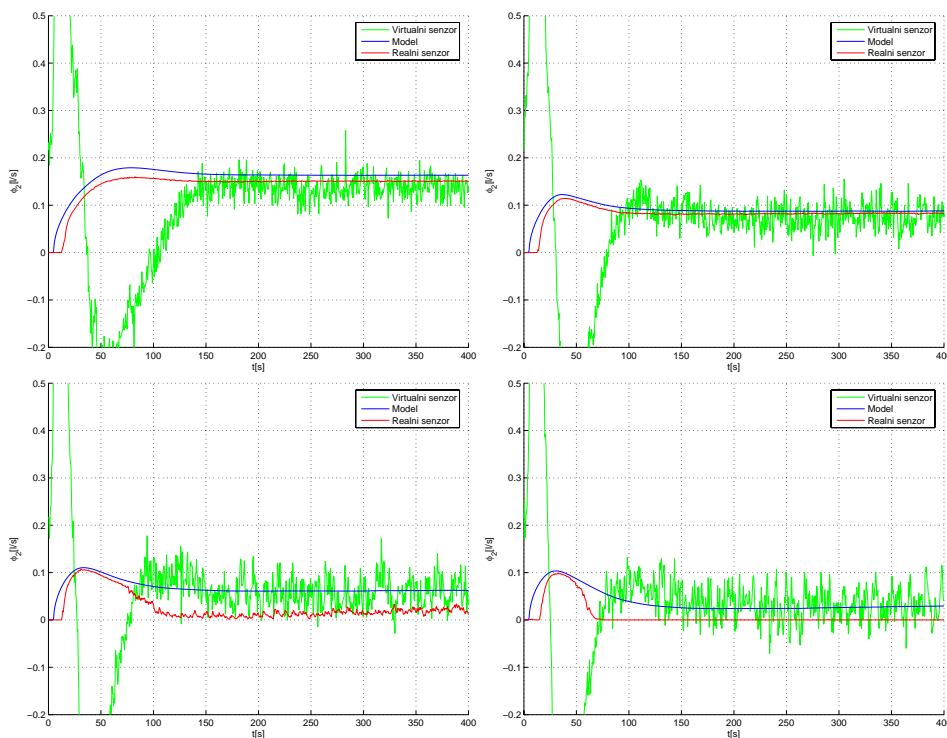
Vidimo, da se vse veličine iz modela dobro ujemajo z realnimi, z izjemo pretoka vode Φ_2 , ter nivoja v rezervoarju R_2 .

Neujemanje nivoja v R_2 je namerno, saj smo model nastavili tako, da so možni tudi dolgi eksperimenti, kjer lahko v shranjevalnik R_2 doteče oz. odteče več vode kot v realnih razmerah. Npr. če bi želeli izvesti eksperiment, kjer iz shranjevalnika v ločevalnik odteče 1 m vode, to v realnem procesu ne bi bilo možno brez dotakanja (ventil V_5) vode v R_2 .

Predvidevali smo, da vzrok neujemanja pretoka vode v modelu in procesu leži v procesu samem in sicer v napaki na merilniku pretoka. Da bi to preverili, smo uporabili virtualni senzor pretoka po enačbi:

$$\Phi_2 = \Phi_W - S_1 \dot{h}_1. \quad (33)$$

Nivo h_1 v zgornji enačbi smo vzeli iz meritev, tako da bi se izračunani pretok moral ujemati z realnim, če bi senzor deloval brezhibno. Dejanske razmere prikazuje slika 27:

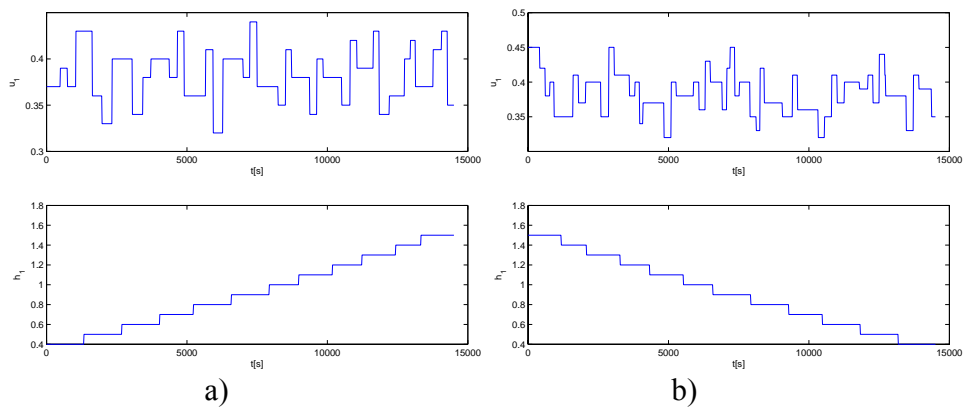


Slika 29 Prehodni pojav pri virtualnem senzorju (zeleno krivuljo) je posledica tega, da je pretok izračunan iz nivoja (oz. odvoda nivoja) v realnem procesu, ki ima prav tako značilen prehodni pojav, kot je vidno na slikah 18 do 26. Zgoraj levo je meritev pri tlaku $p_I=0.9$ bar, zgoraj desno pri $p_I=0.3$ bar, spodaj levo pri $p_I=0.2$ bar ter spodaj desno pri $p_I=0.1$ bar.

Vidimo, da senzor pretoka pri nizkih pretokih ne kaže pravilno, kar pojasni neskladnosti med modelom in procesom. Popravila samega sensorja se zaenkrat nismo lotili, saj napaka v pretoku zanemarljivo (prek nivoja h_1 , ki pa ima veliko časovno konstanto) vpliva na statične razmere drugih veličin (slike 20 do 28).

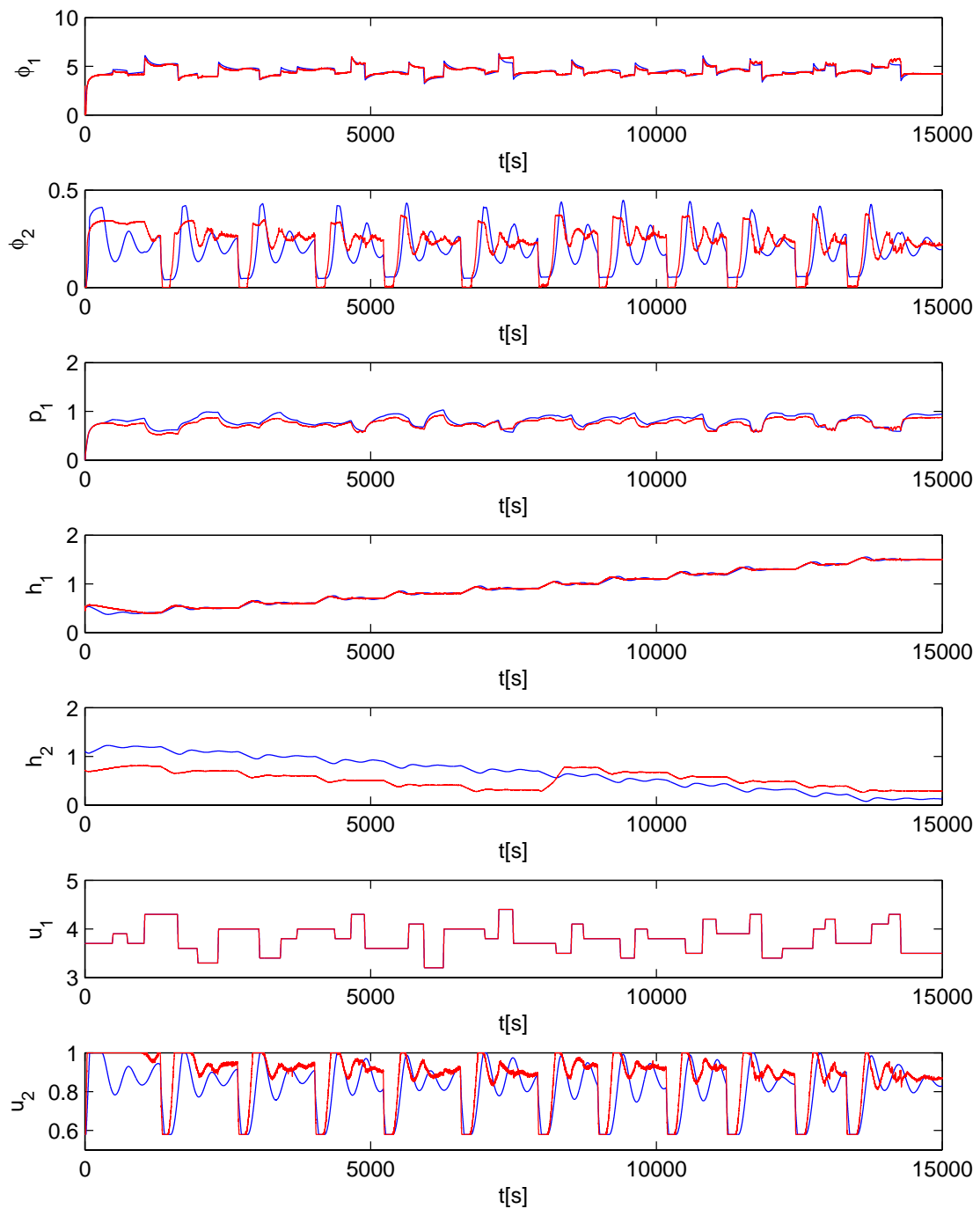
3.2 Validacija dinamičnih razmer

Za preverjanje dinamike smo izbrali zaprtozančni preizkus signali, ki jih prikazuje slika 30:

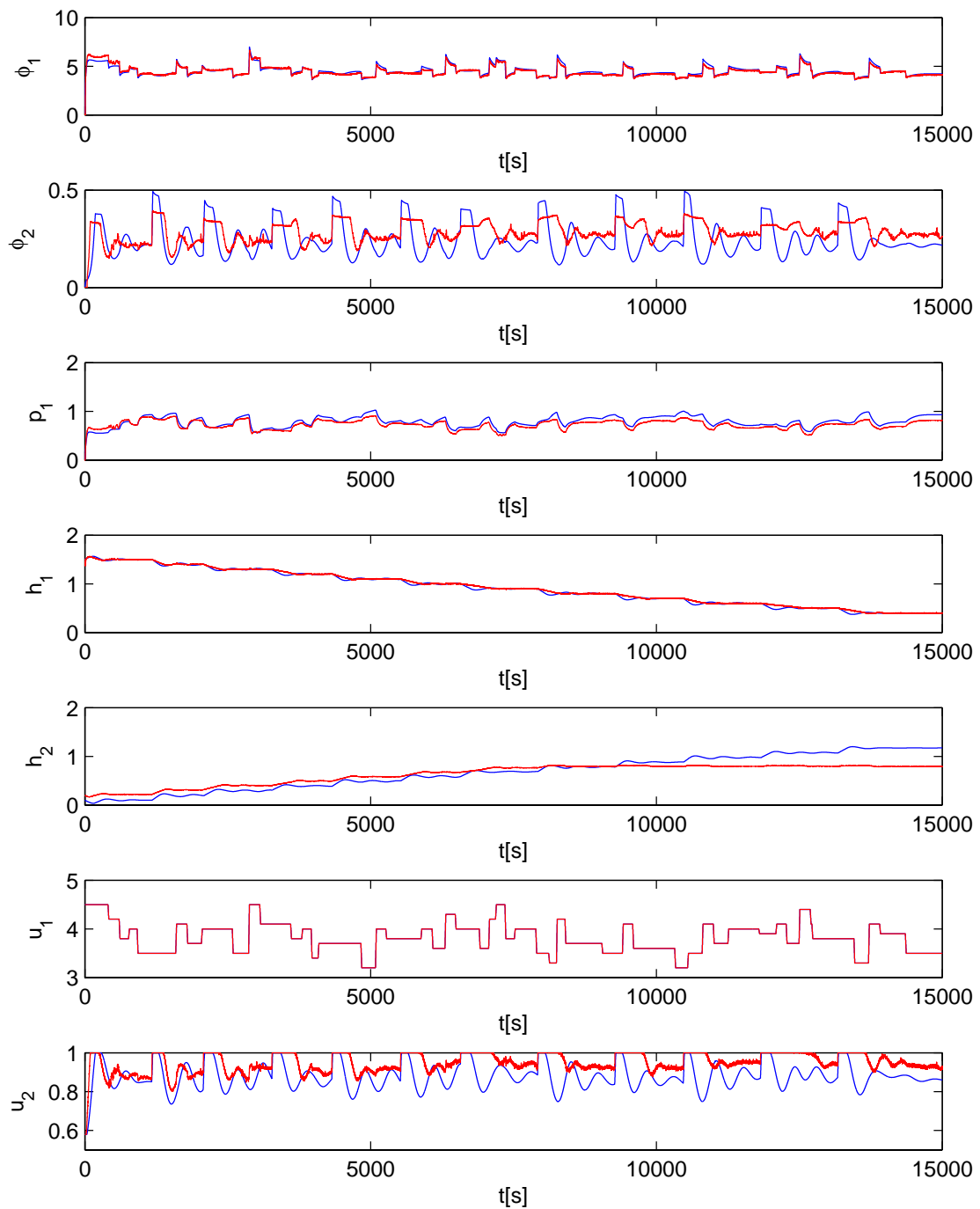


Slika 30 Validacijska signala: regulacija nivoja h_1 , ter naključne spremembe u_1 . Frekvenca črpalke je bila fiksna $f=54$ Hz.

Odzive modela in procesa na validacijska signala vidimo na slikah 31 in 32:



Slika 31 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela

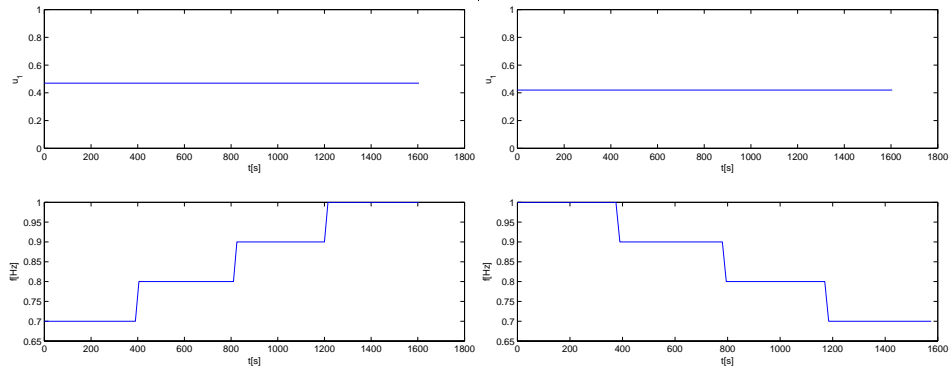


Slika 32 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela

Odstopanje modela od procesa je majhno, razen v primeru pretoka skozi ventil V_2 in v primeru nivoja h_2 . Prvi primer je, kot že rečeno, posledica slabo delujočega merilnika, drugi primer pa je posledica (pre)majhnosti shranjevalnika R_2 (Kot vidimo na sliki 31

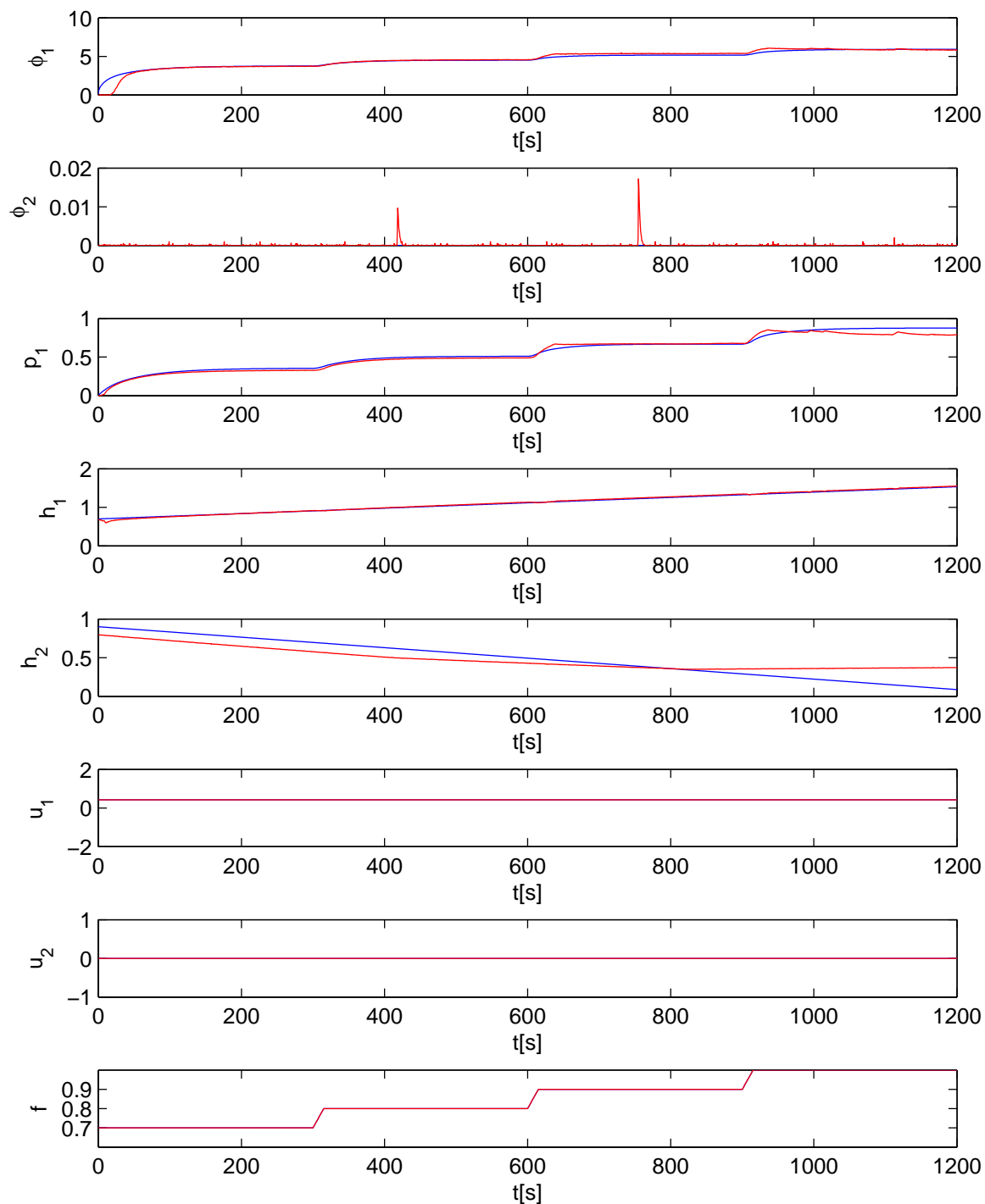
smo morali v realnem primeru v R_2 dotočiti vodo; pri drugi validaciji (slika 32) pa smo vodo odtakali ko je dosegla maksimalni nivo).

Nazadnje je bilo le še potrebno preveriti model pri spreminjanju frekvence na črpalki. Vhodna signala prikazuje slika 33:

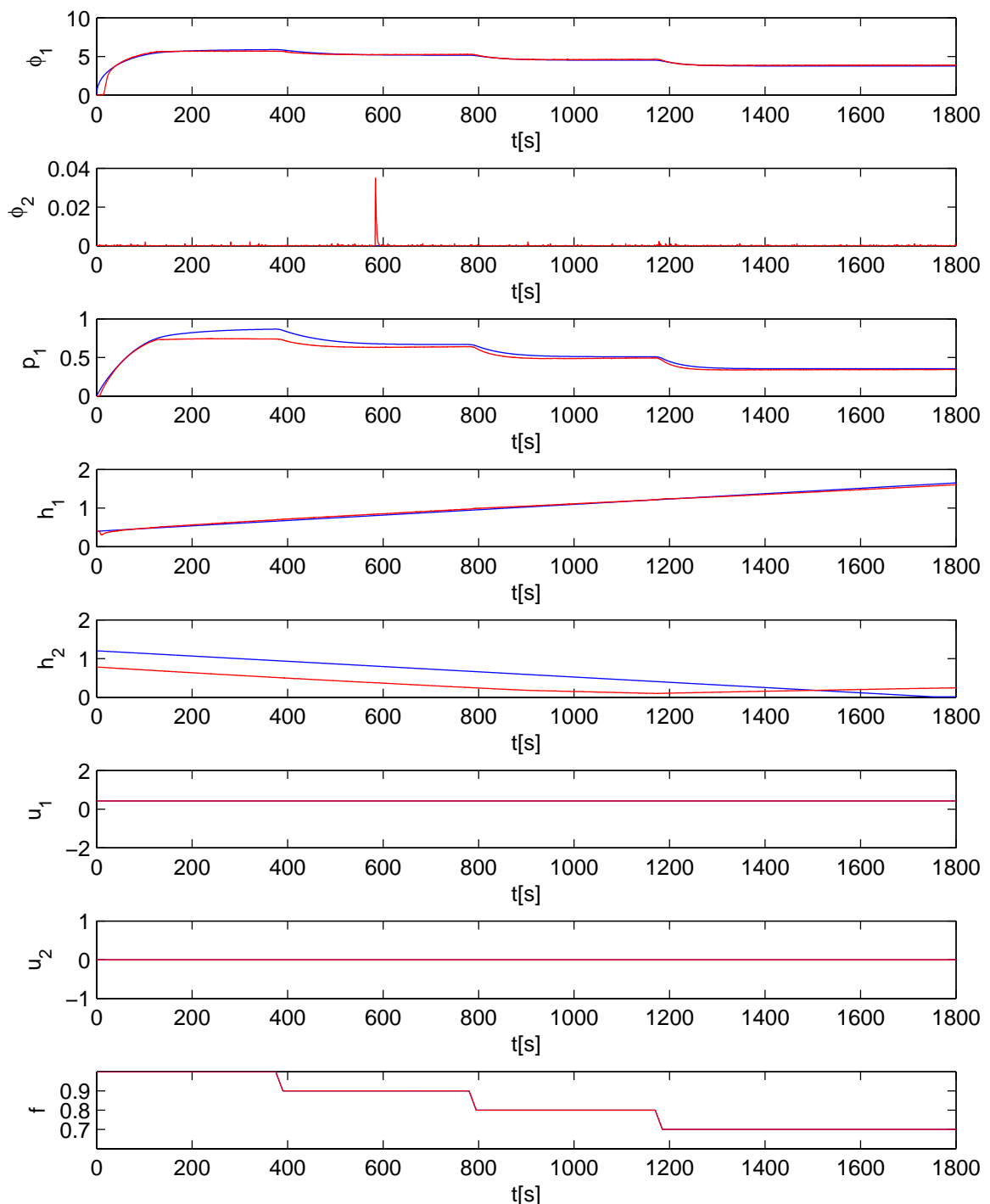


Slika 33 Validacijska signala; konstantna vrednost u_1 ter spreminjajoča se frekvenca. Ventil V_2 je bil zaprt ($u_2=0$)

Odziva na zgornja signala prikazujeta sliki 34 ter 35:



Slika 34 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku h_1 , nivo v rezervoarju h_2 , komandni signal u_1 , komandni signal u_2 ter frekvenca f . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela



Slika 35 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku h_1 , nivo v rezervoarju h_2 , komandni signal u_1 , komandni signal u_2 ter frekvenca f . Z rdečo barvo so označeni signali procesa, z modro pa signali modela

Vidimo, da smo tudi tokrat dobili zadovoljive rezultate, edina odstopanja se pojavijo pri višjih tlakih ter frekvencah. Za te neskladnosti predvidevamo, da se pojavijo kot posledica nemodelirane dinamike.

4. Zaključek

Pridobili smo model procesa ločevanja vode in plina, ki zadovoljivo deluje za tlak p_1 ter izhodni pretok zraka Φ_1 , česar pa ne moremo trditi za izhodni pretok vode Φ_2 , kar je posledica slabo delujočega senzorja, česar pa se z modeliranjem samim ne da odpraviti. Če bi želeli bolj natančen model, bi bilo torej najprej potrebno popraviti oz. zamenjati merilnik pretoka (*FT2*) na realni napravi.

Tudi merilnik nivoja v R_1 ne deluje brezhibno, kar se odraža v izredno močnem prehodnem pojavu poteka nivoja v separatorju. Predvidevali smo, da je vzrok v zračnem mehurčku v negativni sponki merilnika. Omenjeni prehodni pojav bi lahko zelo omilili ali pa skoraj povsem izničili, samo z odzračenjem dotičnega merilnika.

Uporabljena črpalka je že precej stara, tako da puščanje ni zanemarljivo (vendar pa tudi ne preveč moteče za samo vodenja procesa). Večji problem je, da je črpalka narejena predvsem za prečrpavanje plinov, kar ima za posledico moteč dejavnik, da je pritok vode v R_1 povsem neodvisen od hitrosti črpalke. Tako se z višanjem/nišanjem frekvence črpalke veča/manjša le pritok zraka (plina) v ločevalnik. Moje mnenje je, da bi bilo potrebno črpalko zamenjati.

Manjši problem je tudi z dotokom vode v črpalko. Kljub temu da je proces "avtomatiziran", je namreč potrebno ob vsakem zagonu ročno odpreti dotok vode v črpalko, ter ga po zagonu tudi ročno zapreti. To pomeni, da mora operater dvakrat vstati ter na drugem koncu laboratorija odpreti pipo. Če nič drugega, mu to onemogoči direktno opazovanje prehodnega pojava. Predlagal bi avtomatizacijo pipe tako, da bi ob vsakem zagonu procesa voda pritekla v črpalko brez posredovanja operaterja.

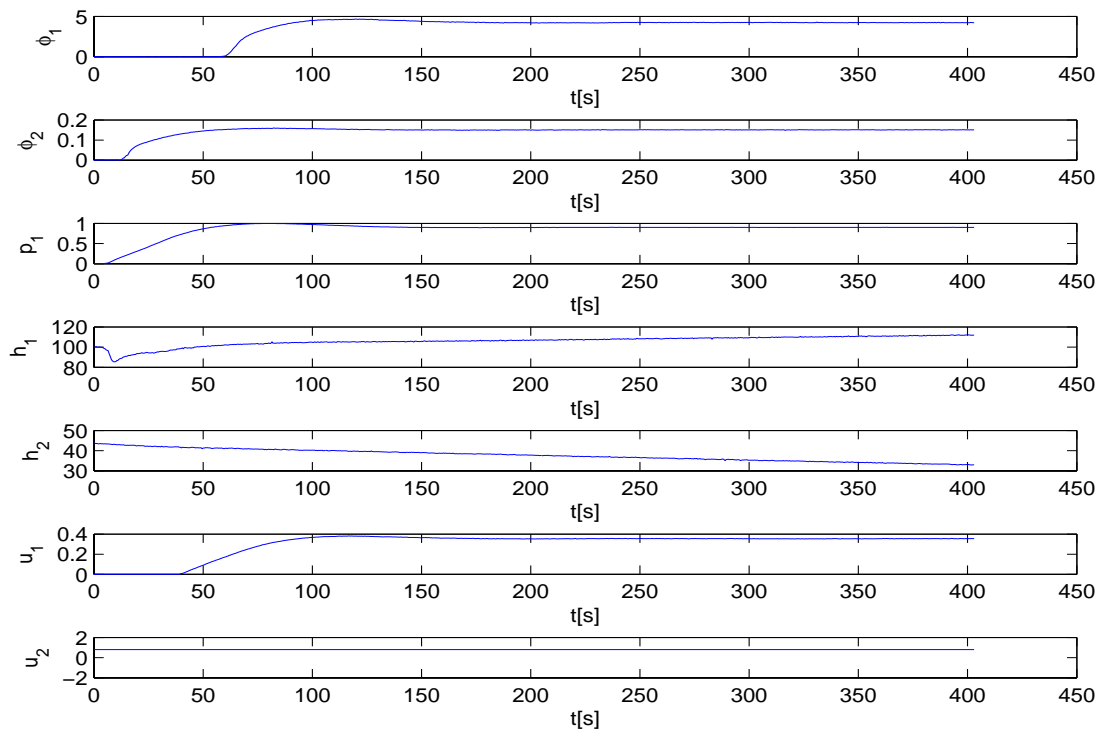
DODATEK A - Tabela konstant

Tabela 9 Konstante

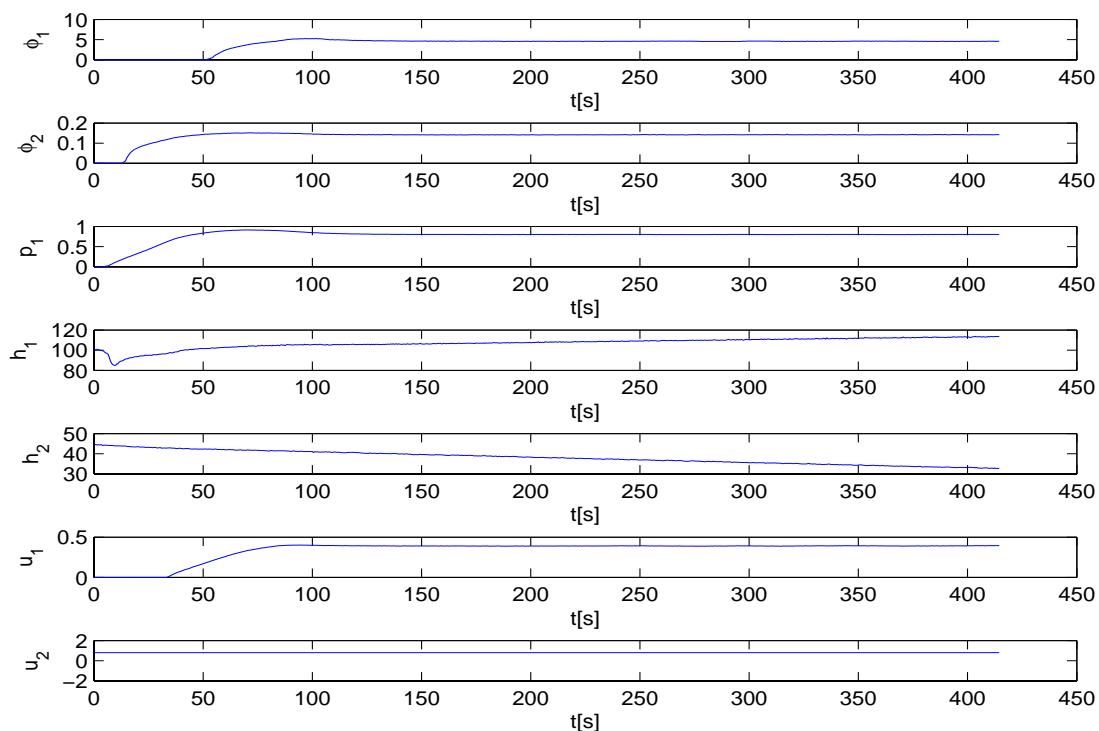
Konstanta	Vrednost	Opis
S_1	0.312 m ²	Presek separatorja R ₁
S_2	0.32 m ²	Presek rezervoarja R ₂
p_0	1.033 bar	Normalni atmosferski tlak
h_{R1}	2.25 m	Višina separatorja R ₁
K_W	0.0981 bar/m	Proporcionalni faktor med nivojem v metrih ter tlakom v barih
K_F	0.001 m ³ /l	Proporcionalni faktor med pretokom v m ³ /s ter l/s
Φ_W	0.217 l/s	Pretok vode v R ₁
\dot{v}_{max}	0.66 s ⁻¹	Največja hitrost odpiranja ventila
\dot{v}_{min}	-0.33 s ⁻¹	Najmanjša hitrost odpiranja ventila

DODATEK B - Meritve za model ventila V₁

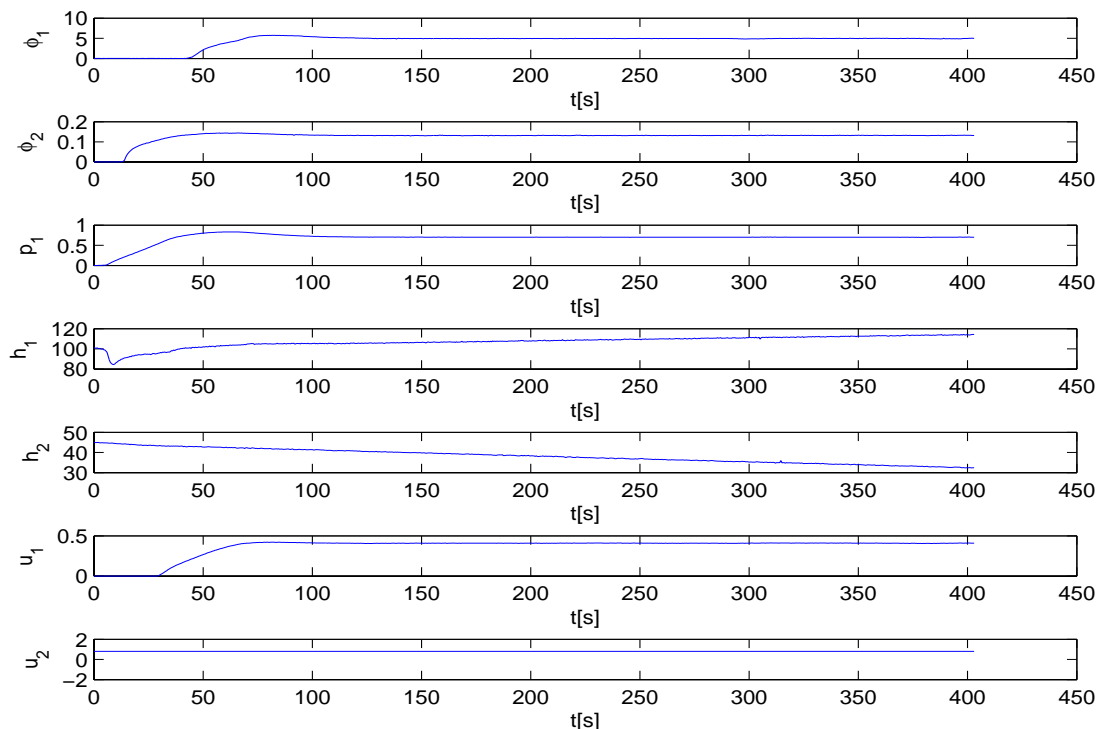
(potrebno je vedeti da h_2 ne predstavlja dejanskega nivoja v T2, ter da pretok ϕ_2 ni nujno pravilen)



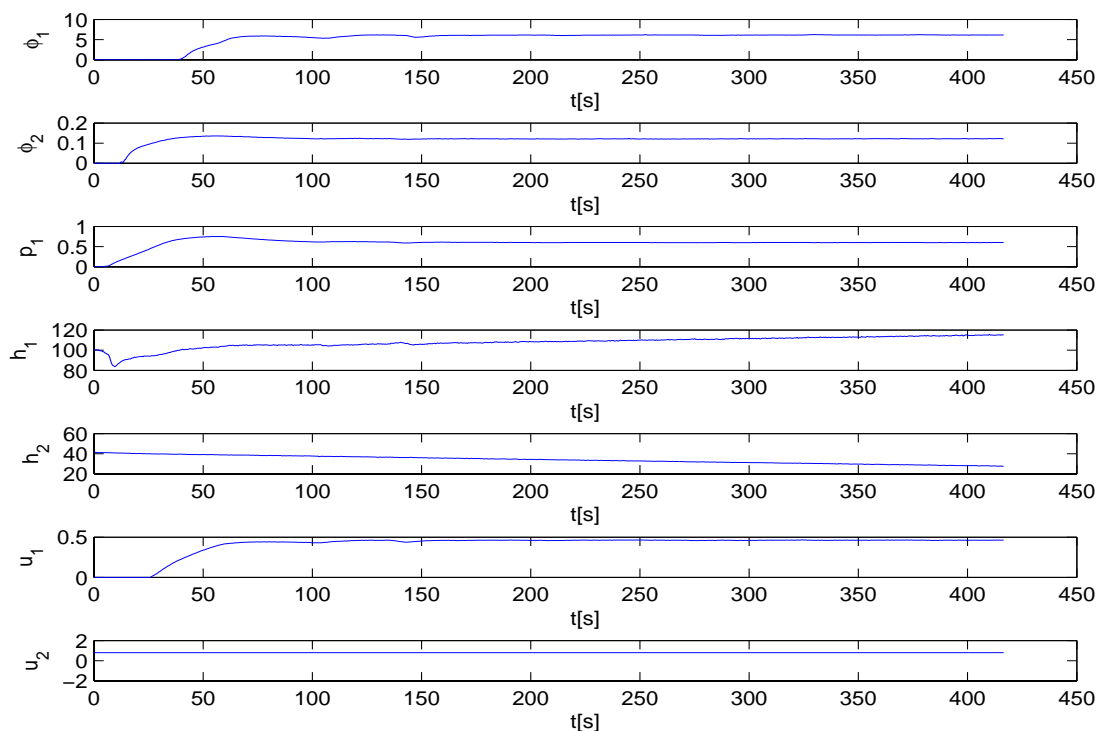
Slika 36 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V₁, pretok vode skozi V₂, tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



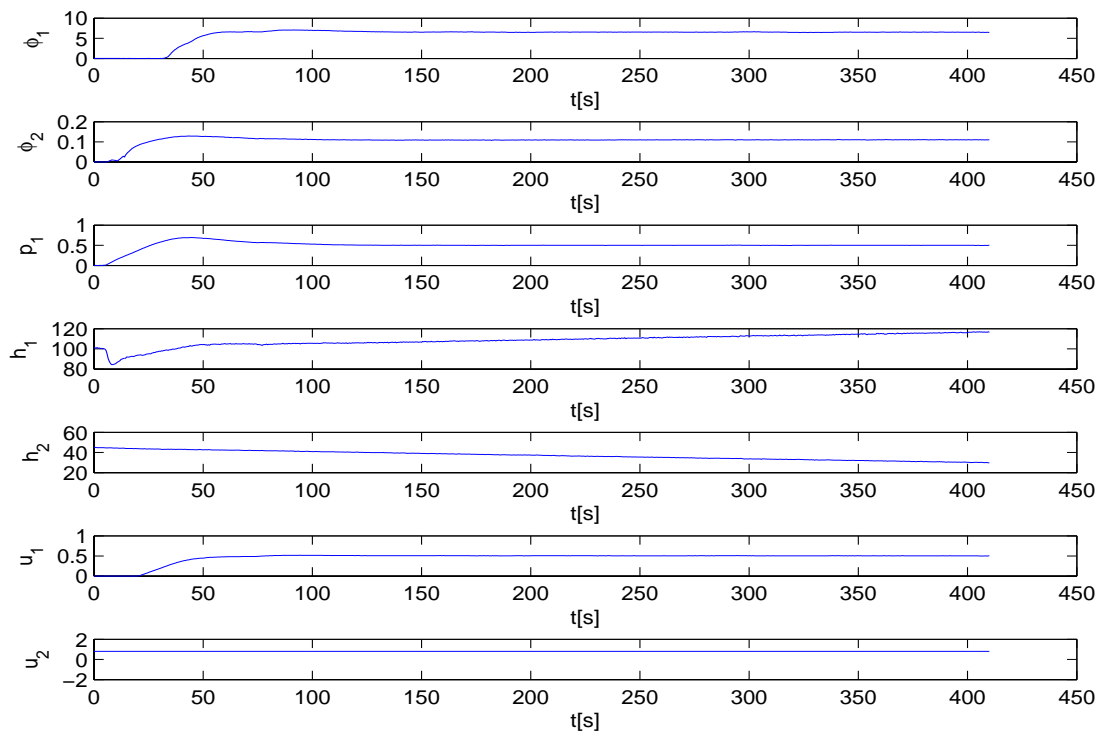
Slika 37 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



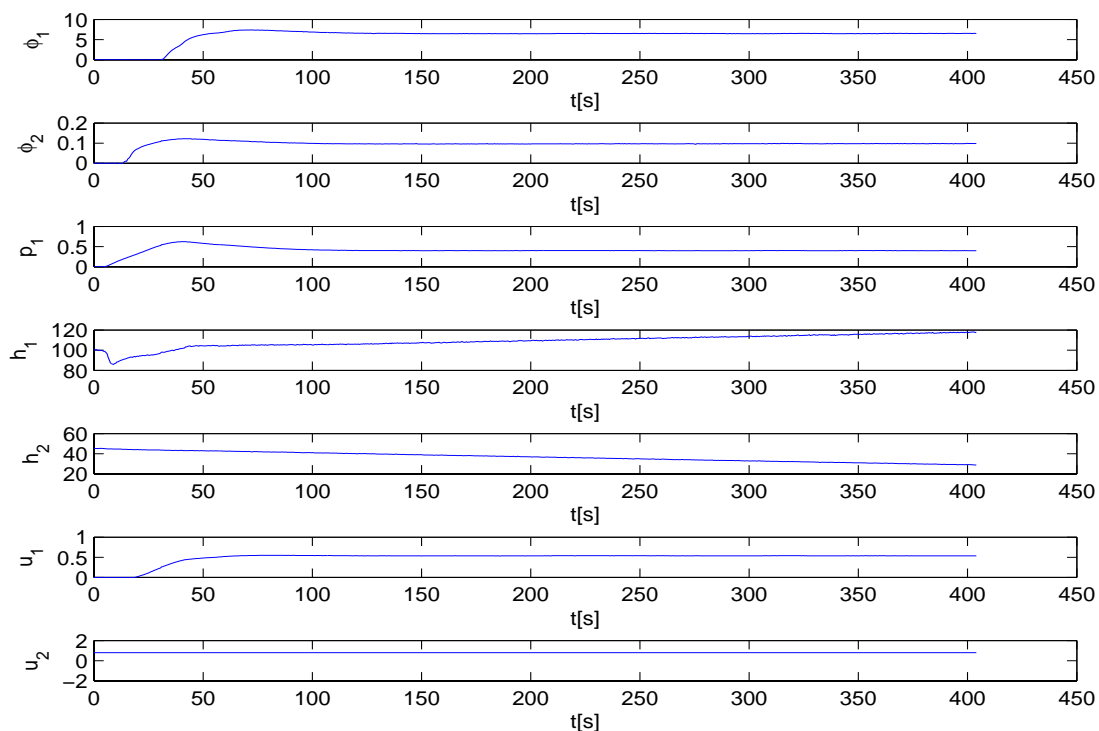
Slika 38 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



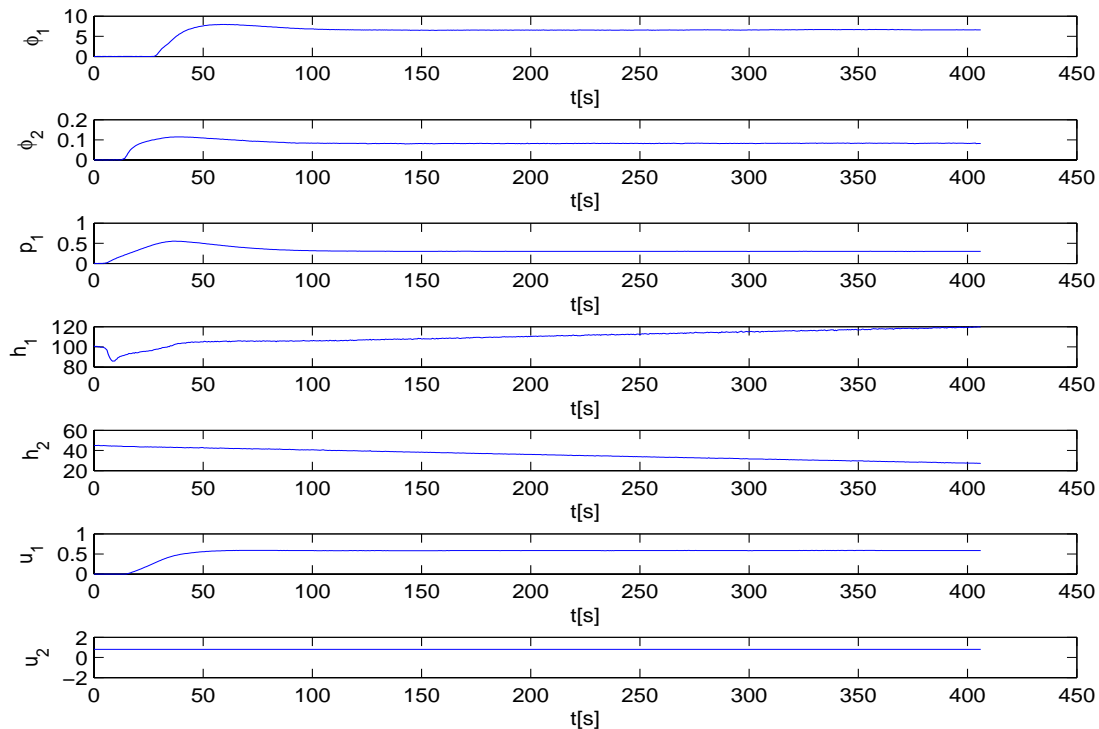
Slika 39 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



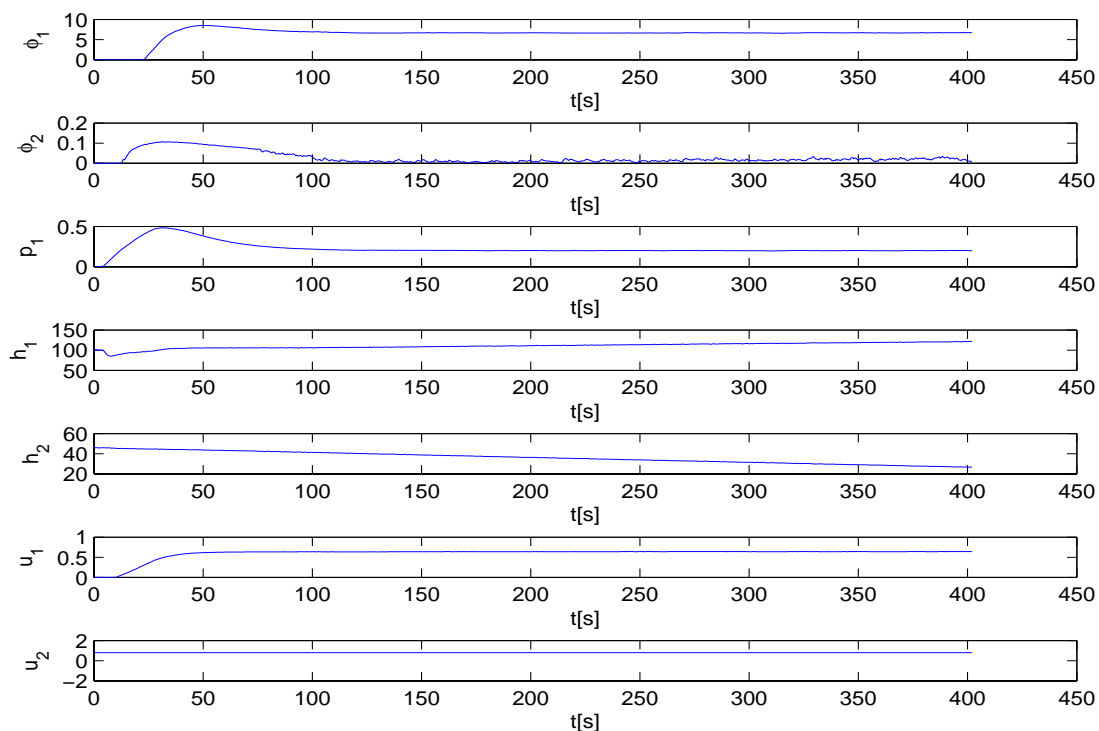
Slika 40 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



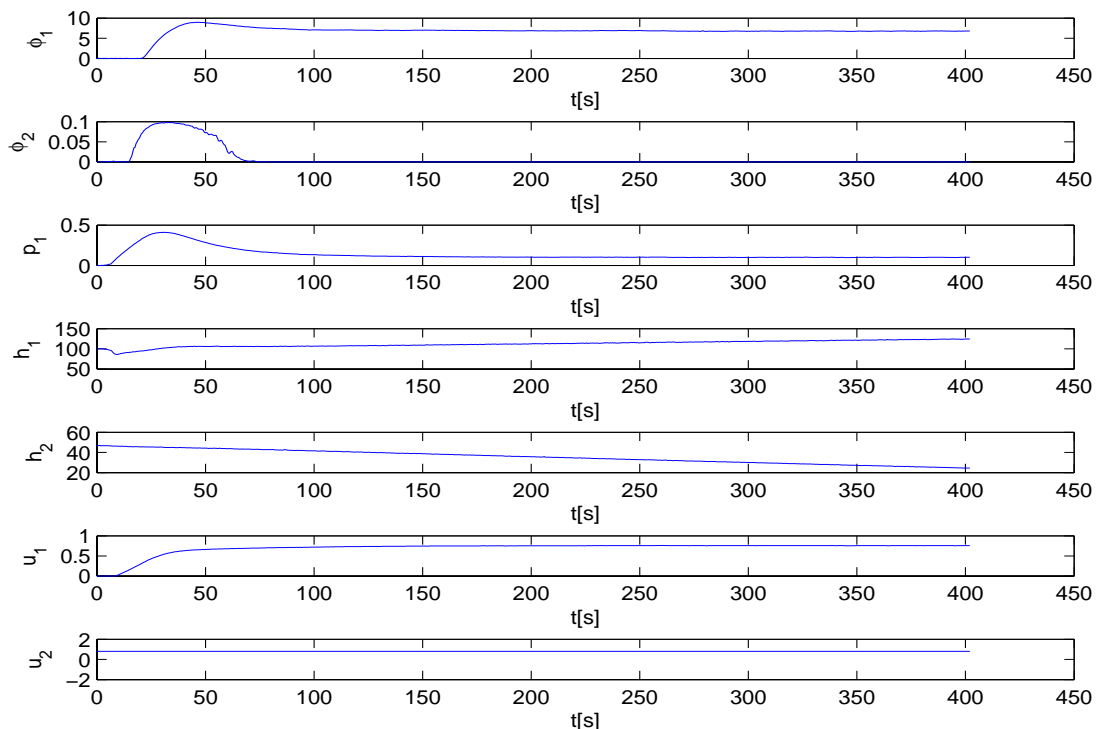
Slika 41 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



Slika 42 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.

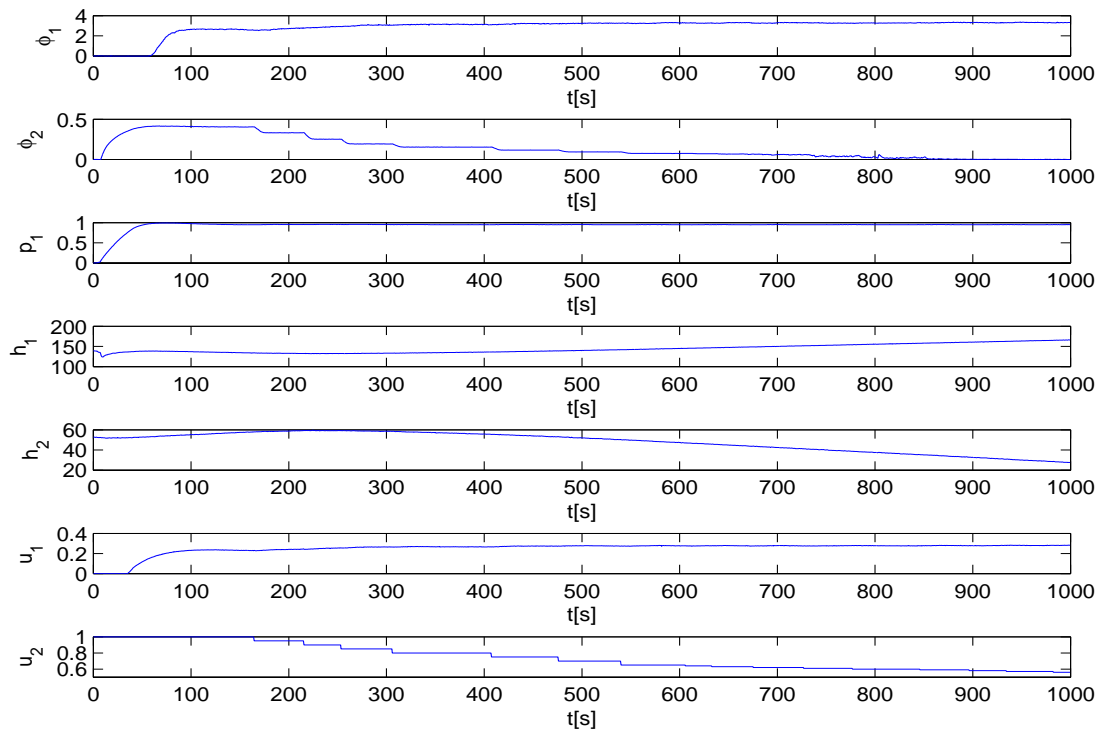


Slika 43 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



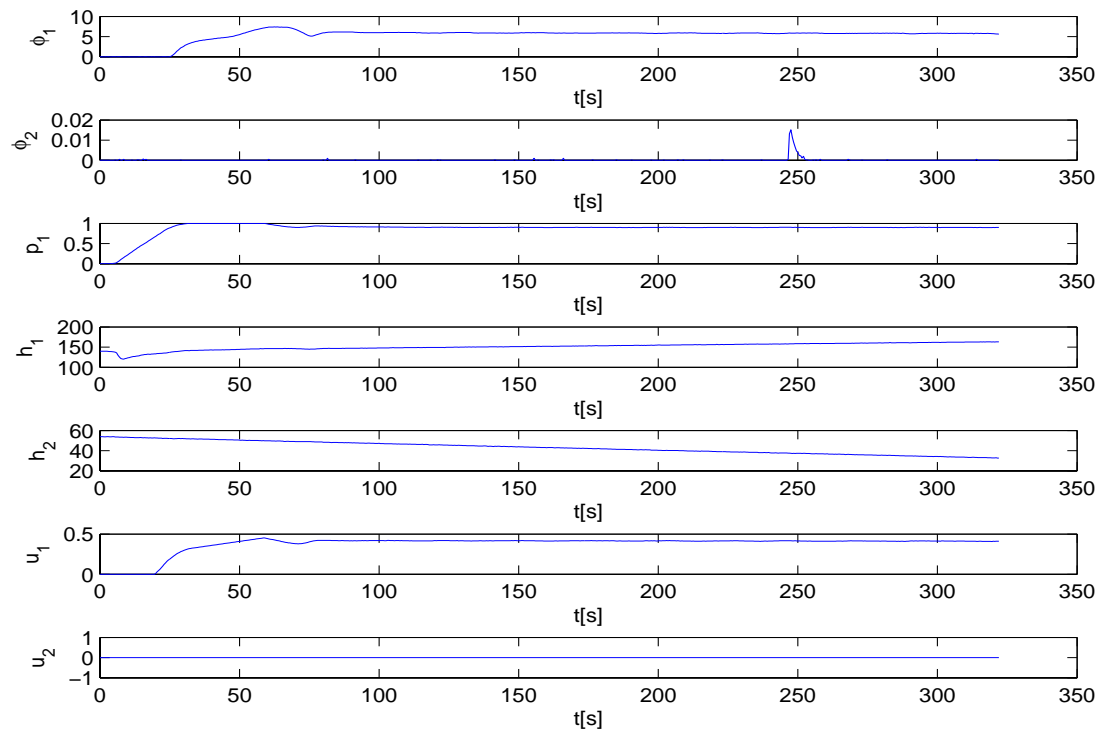
Slika 44 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.

DODATEK C - Meritev za model ventila V_2

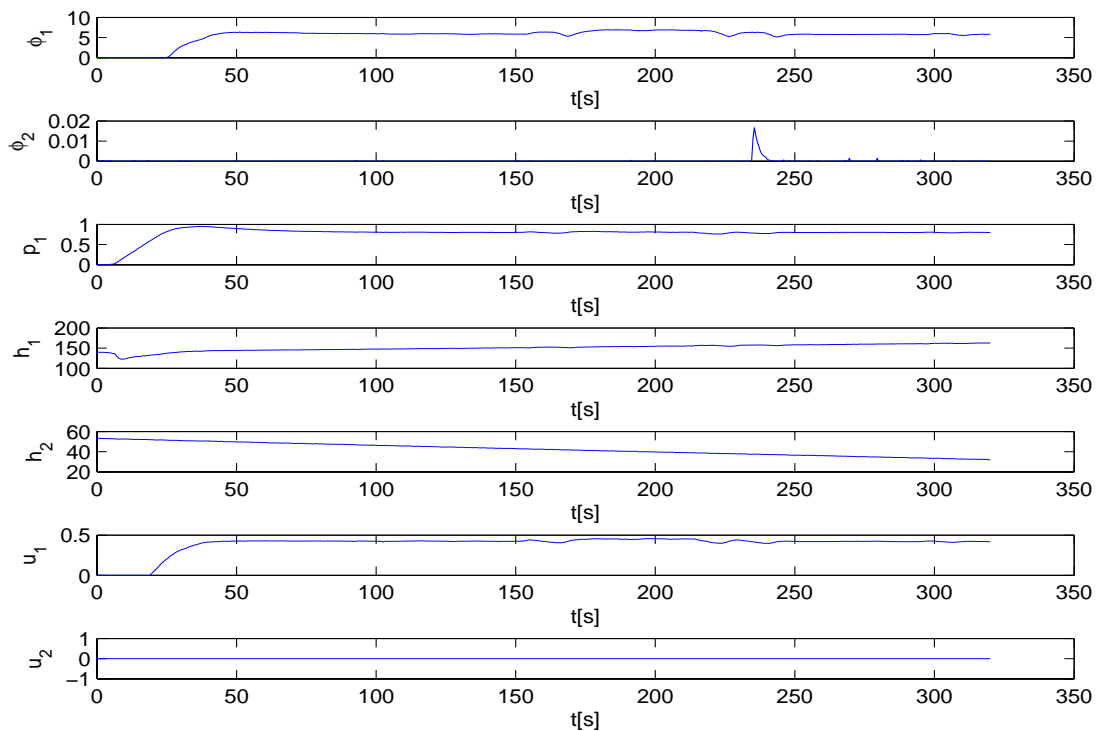


Slika 45 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60$ Hz.

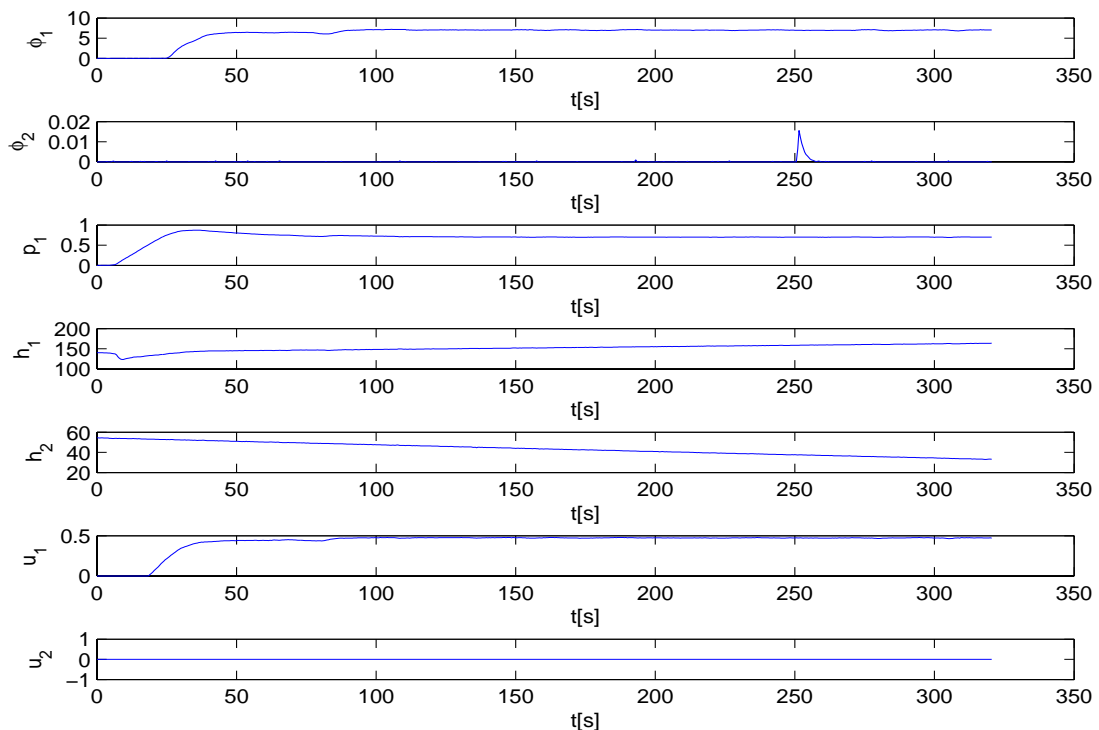
DODATEK D - Meritve za model pretoka zraka ter vode skozi injektor



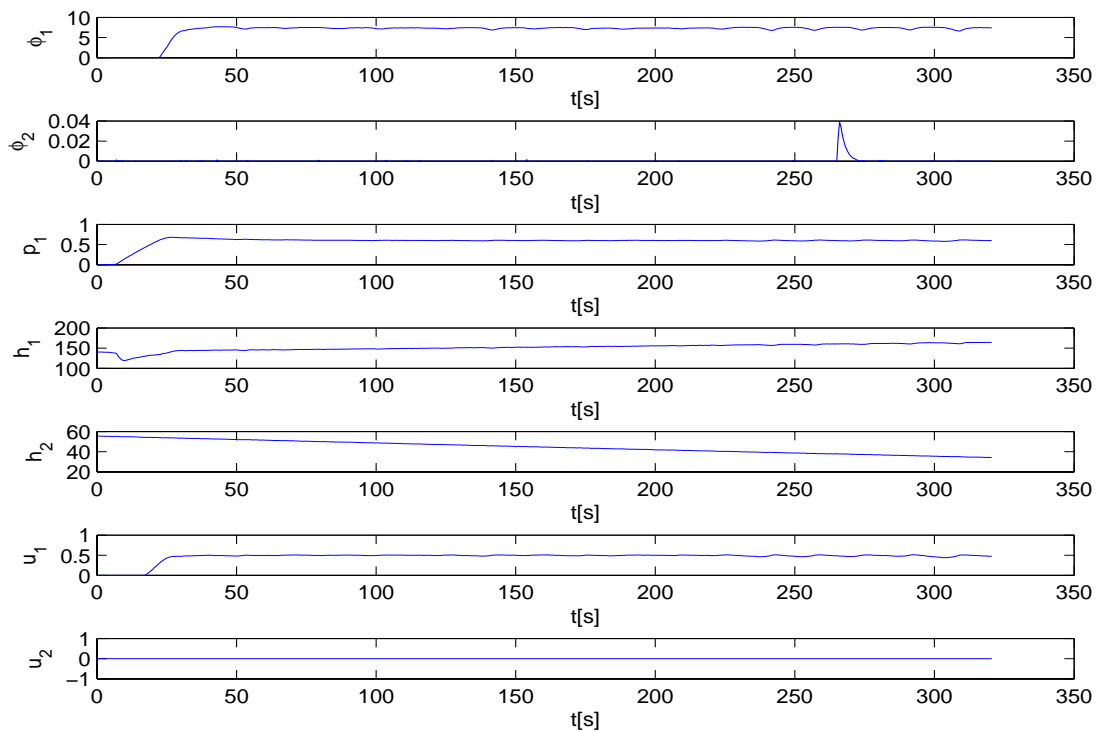
Slika 46 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



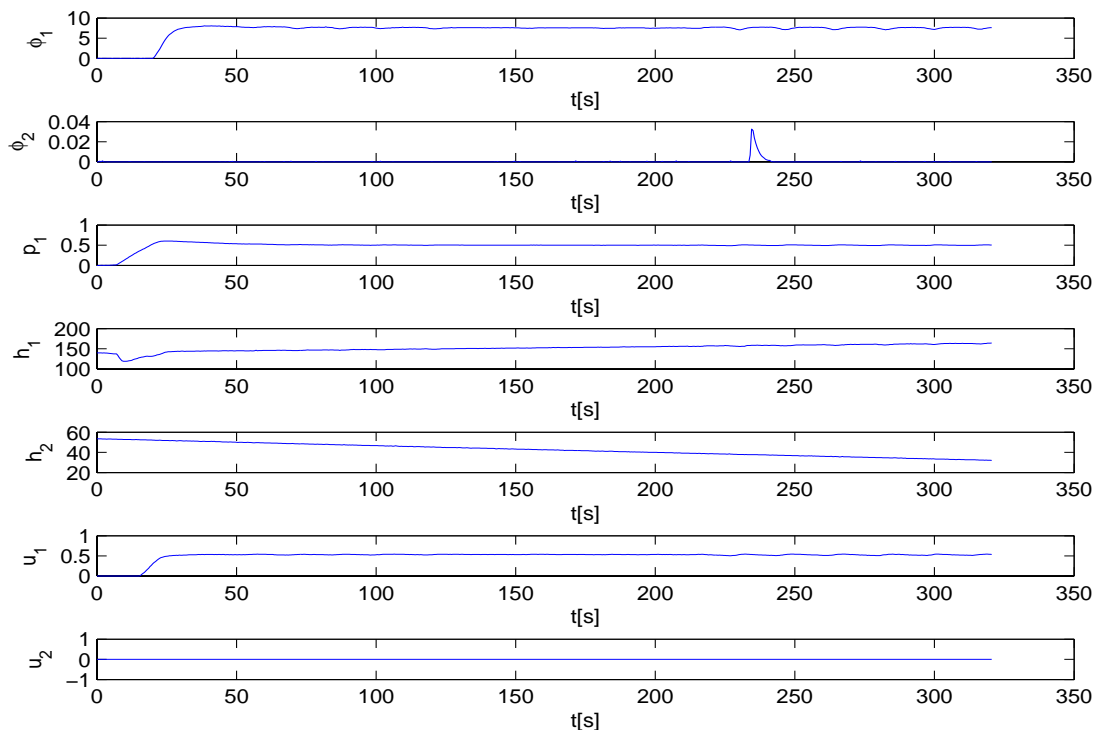
Slika 47 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



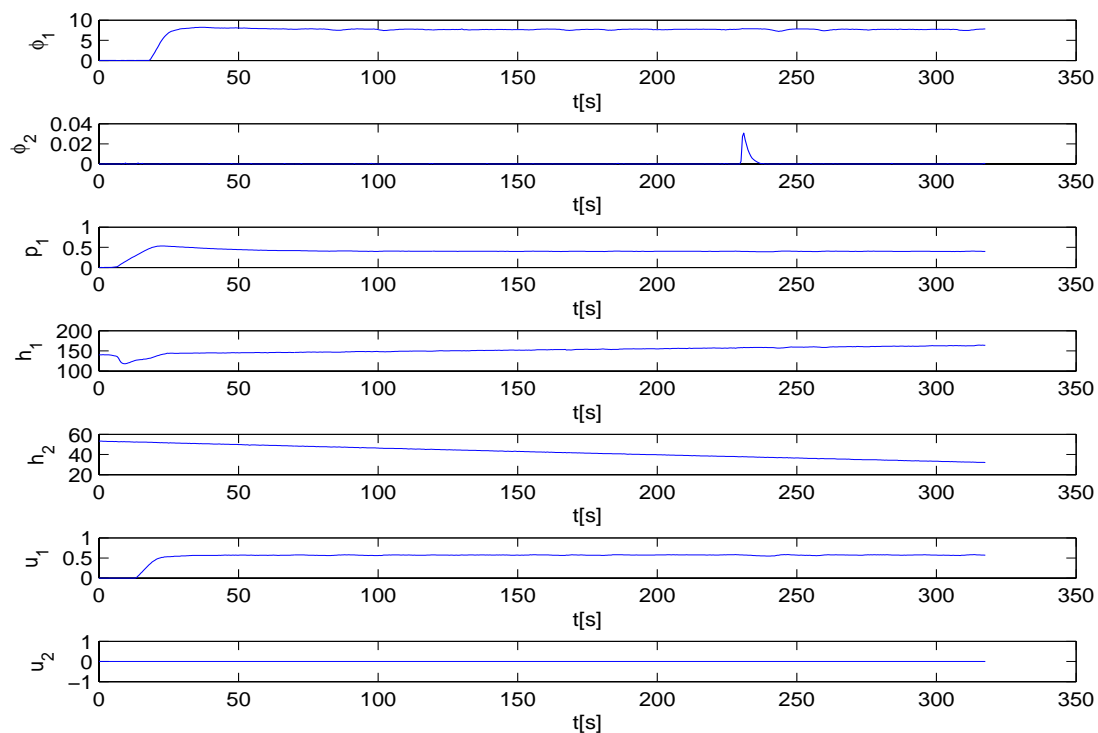
Slika 48 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



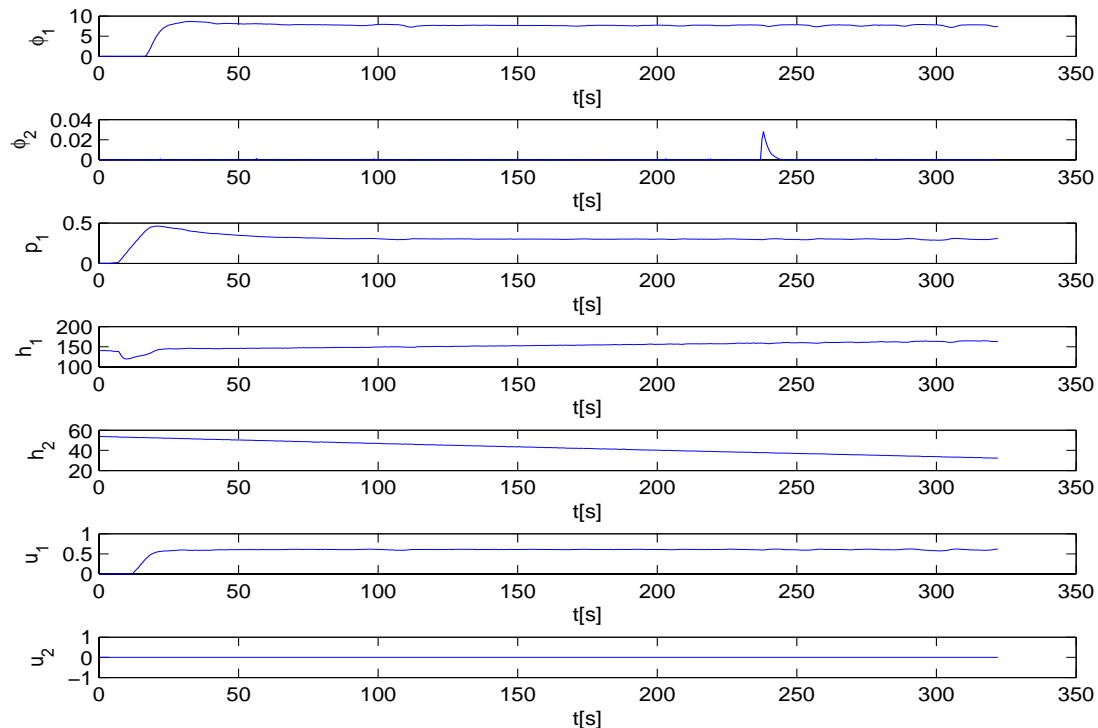
Slika 49 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



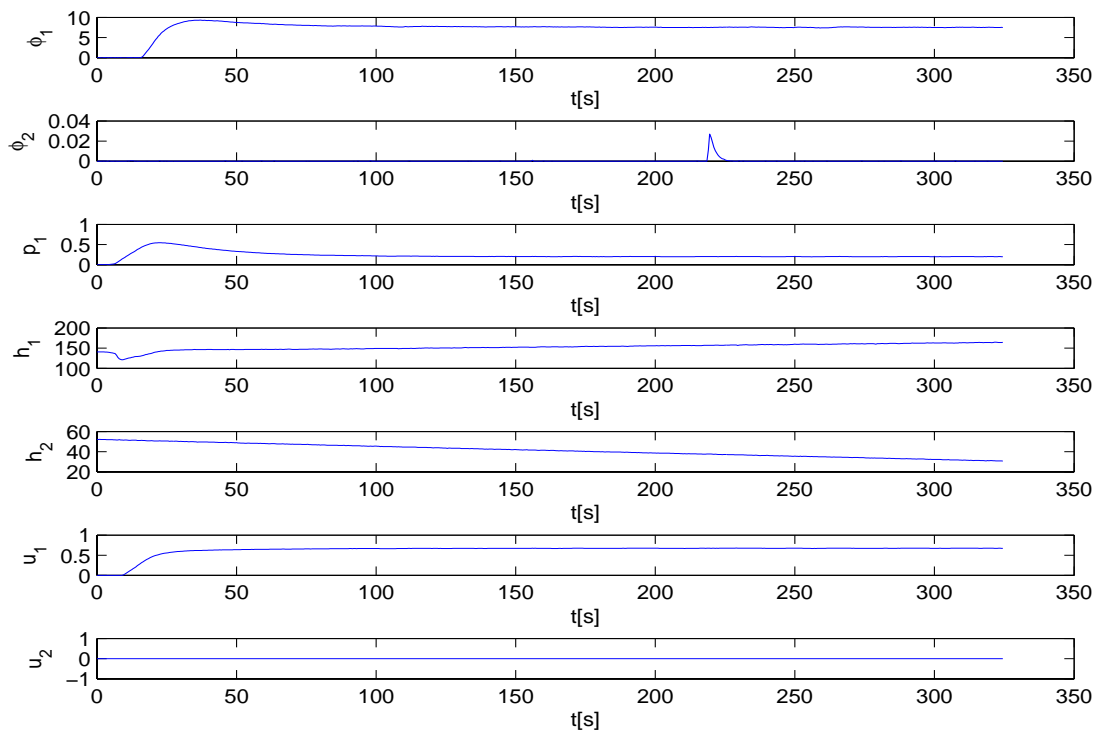
Slika 50 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



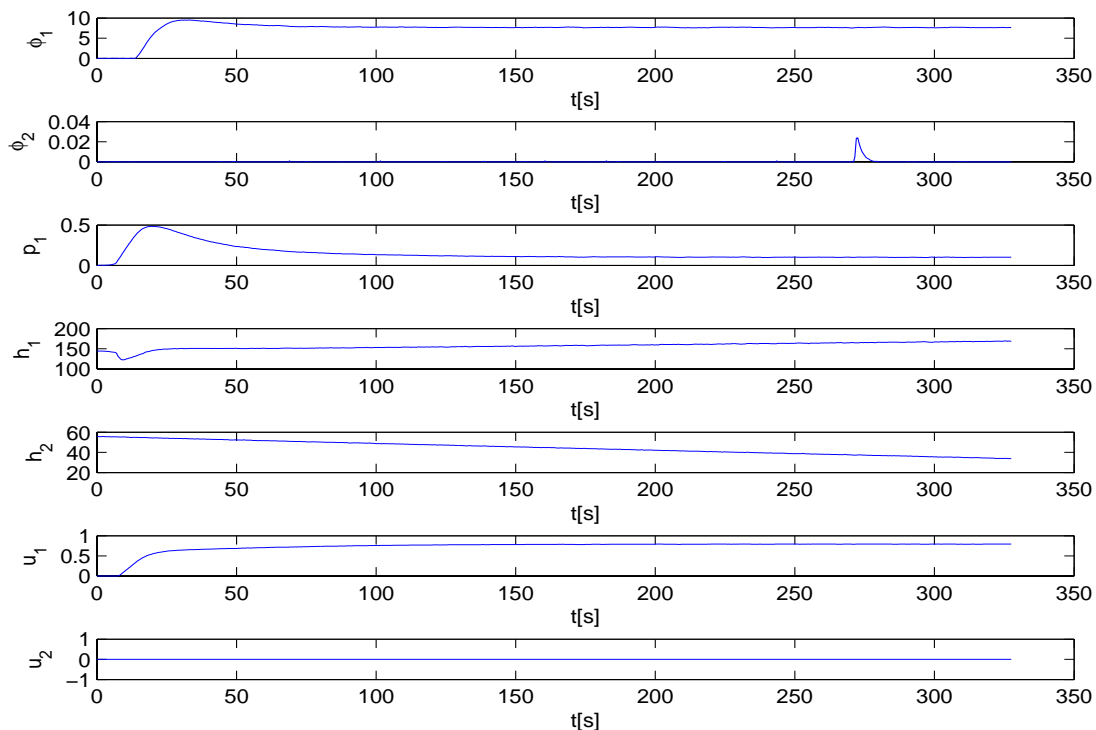
Slika 51 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



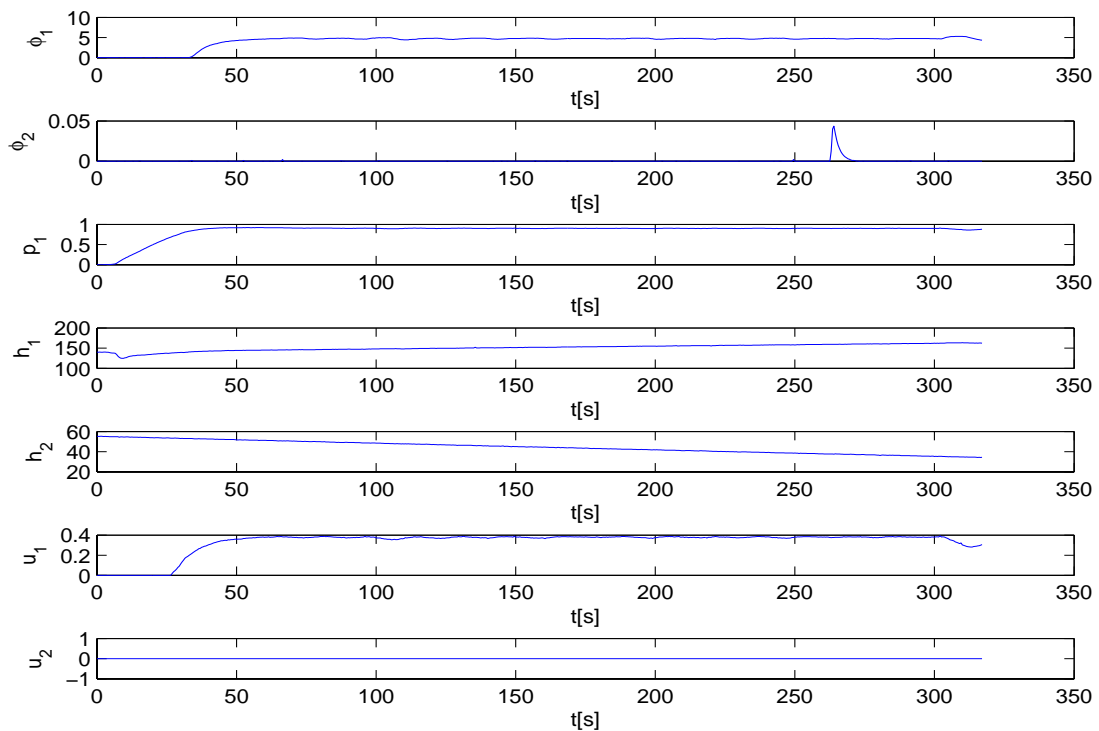
Slika 52 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



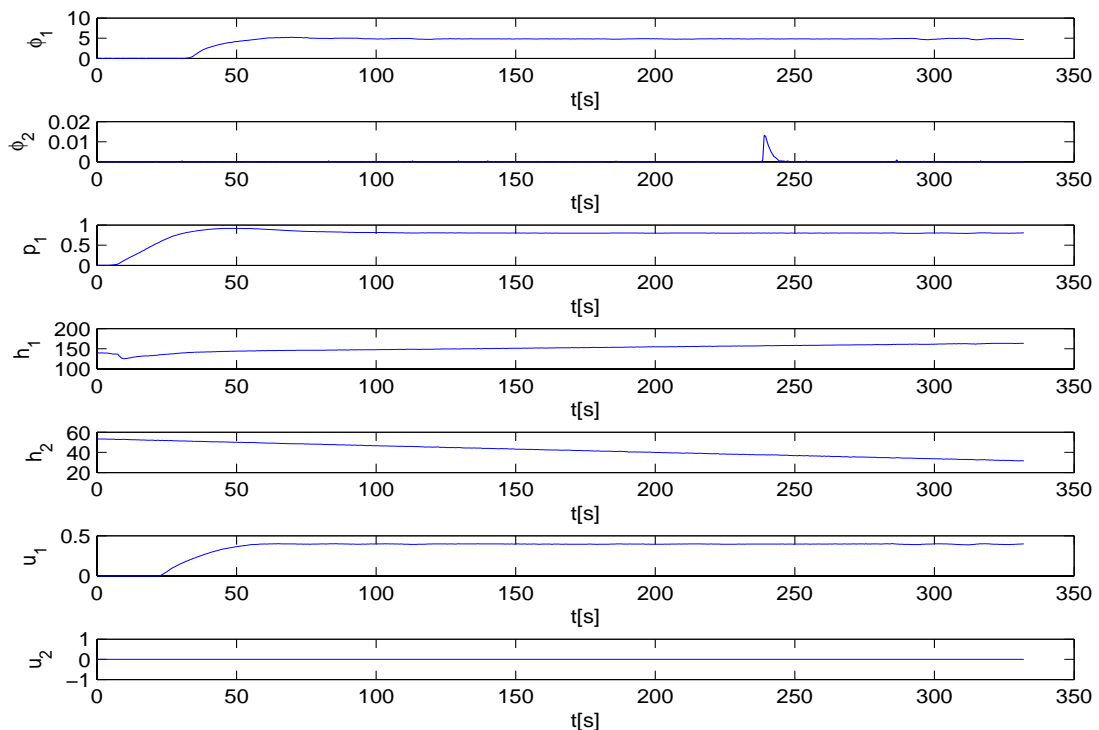
Slika 53 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



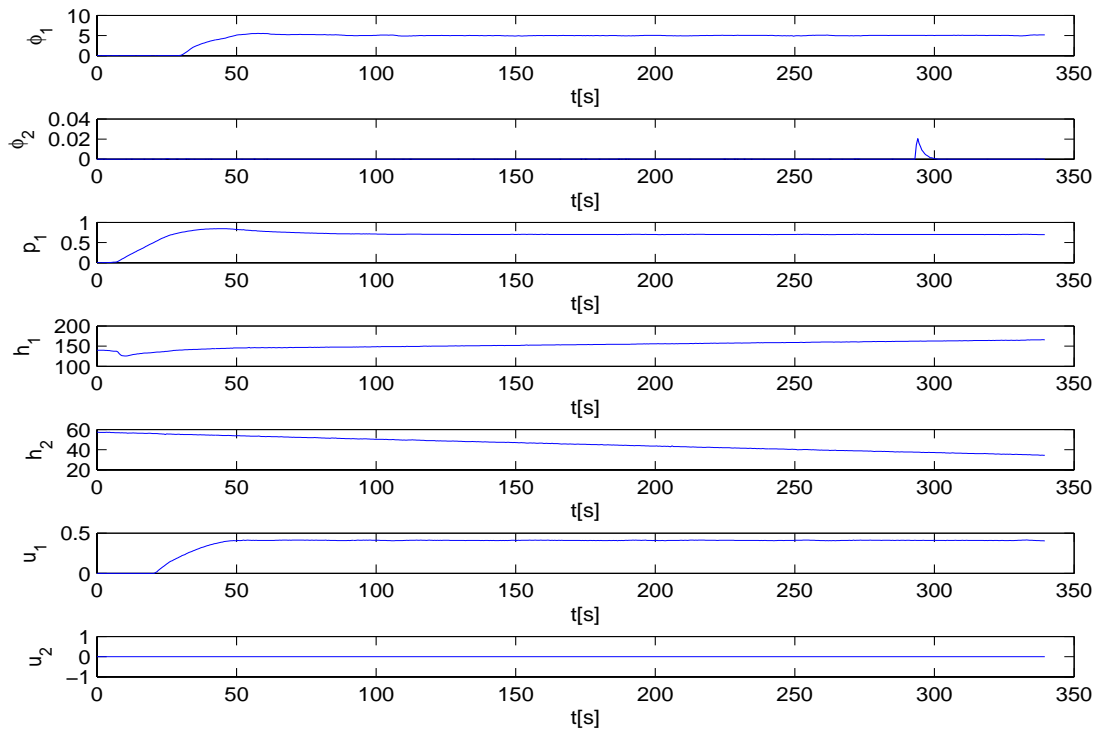
Slika 54 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 60\text{Hz}$.



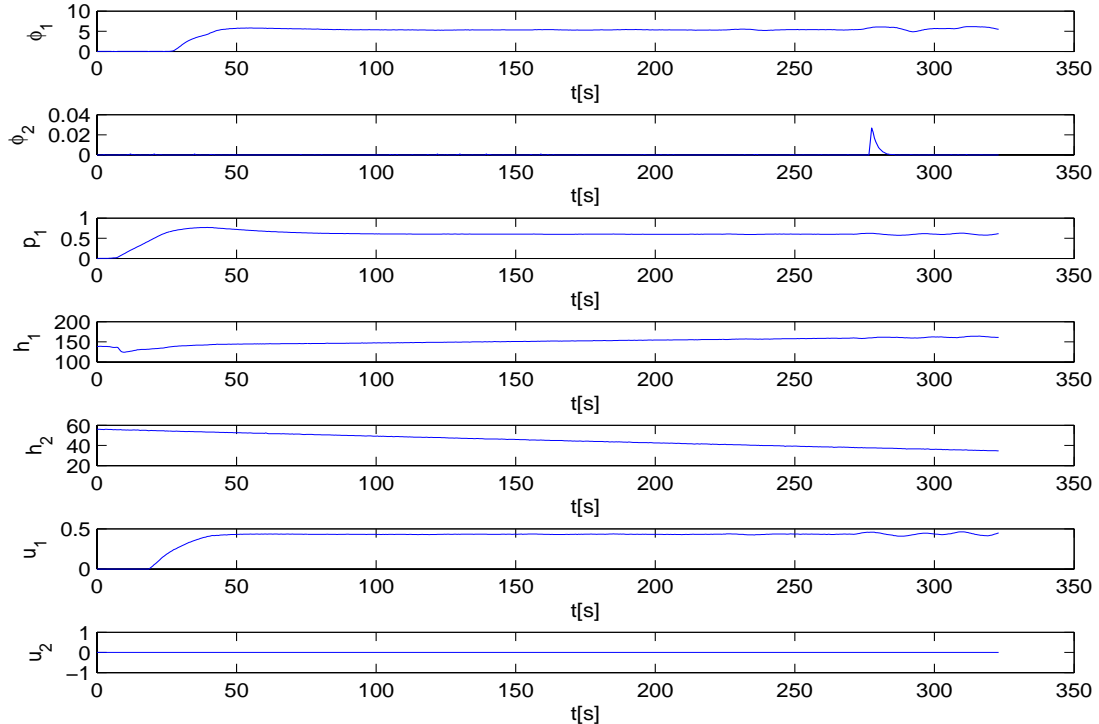
Slika 55 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



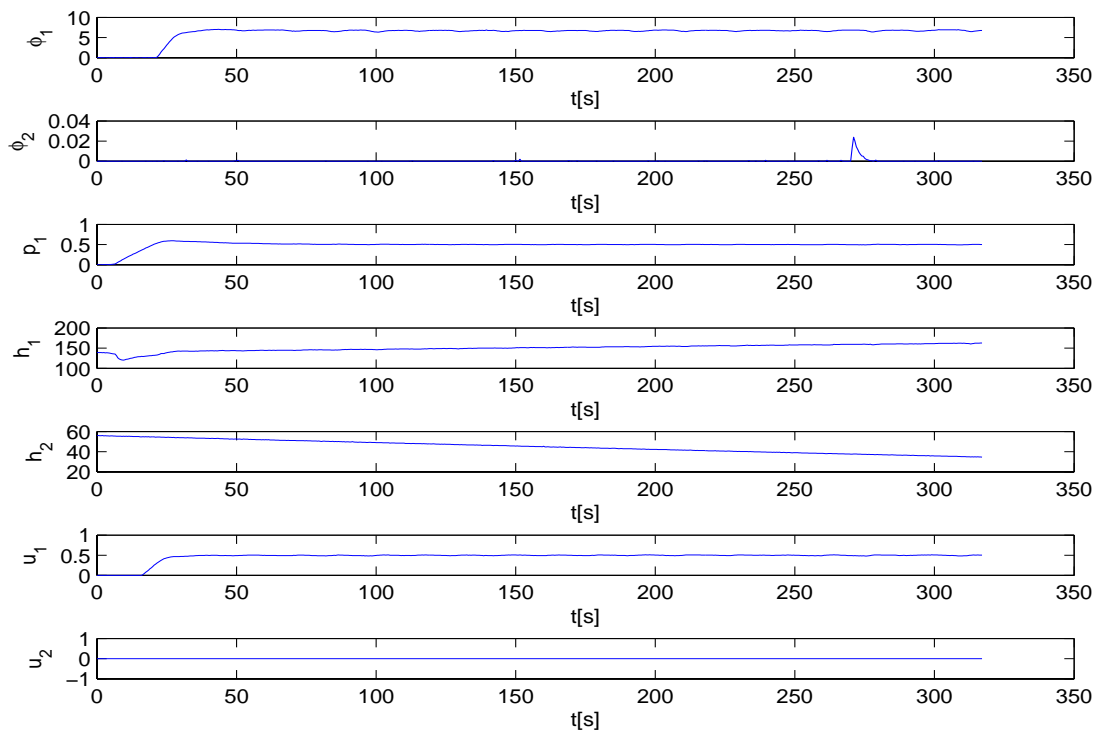
Slika 56 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



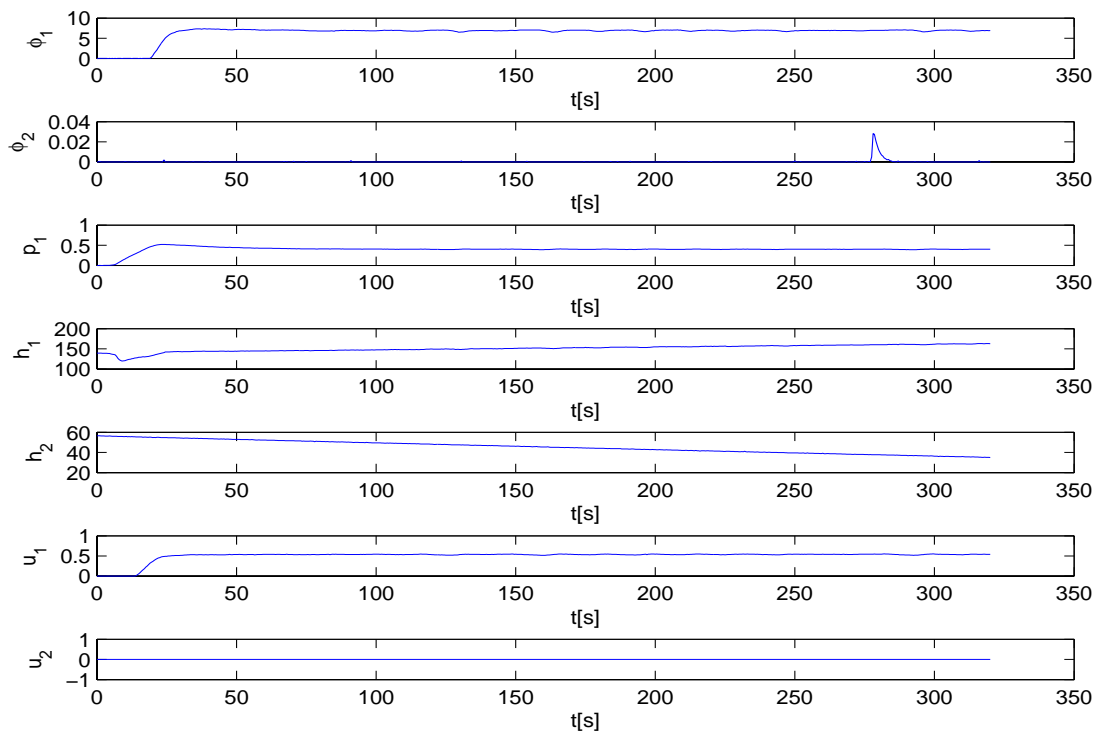
Slika 57 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



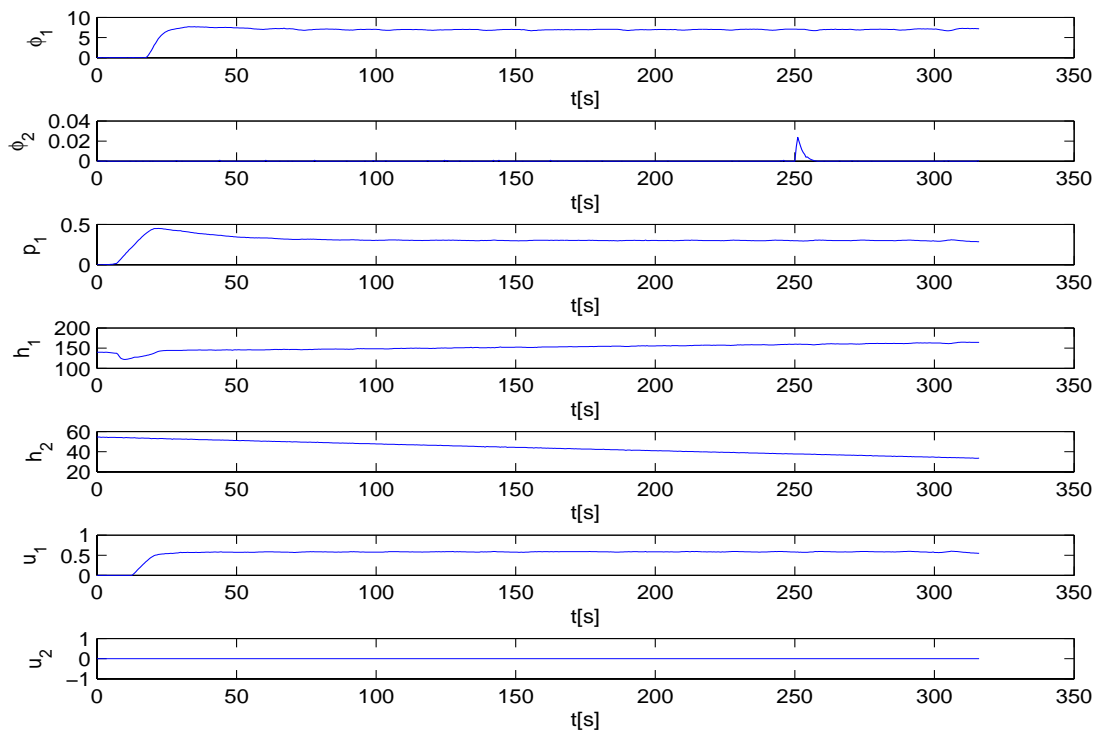
Slika 58 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



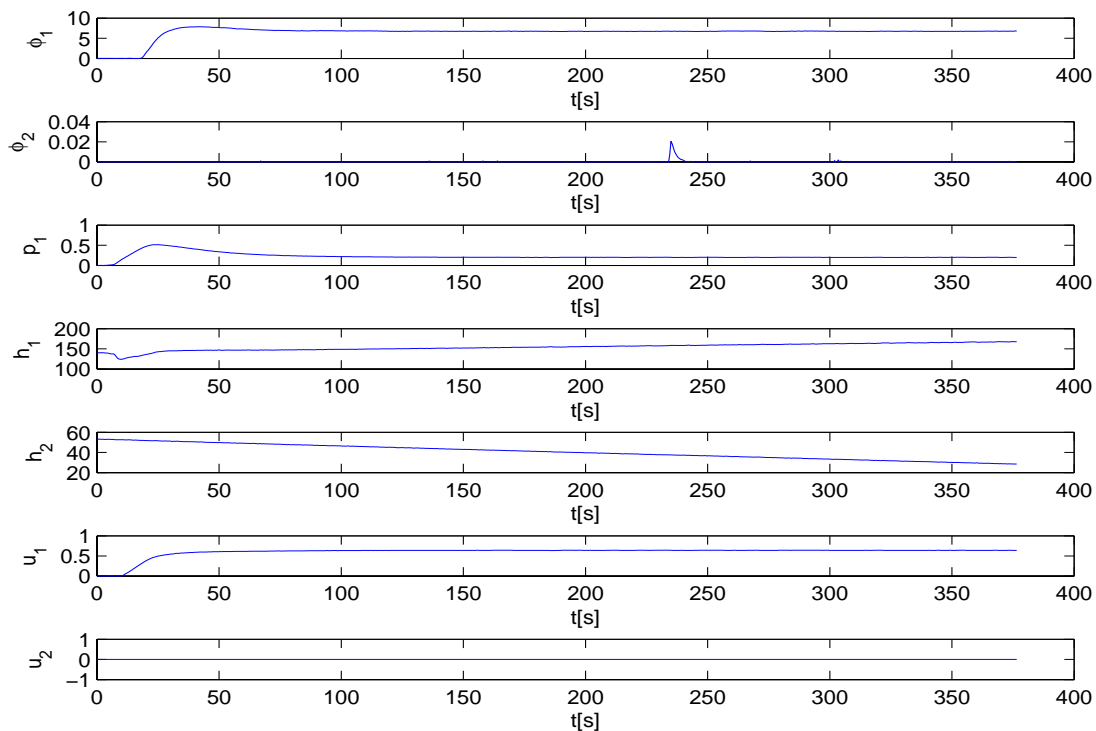
Slika 59 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



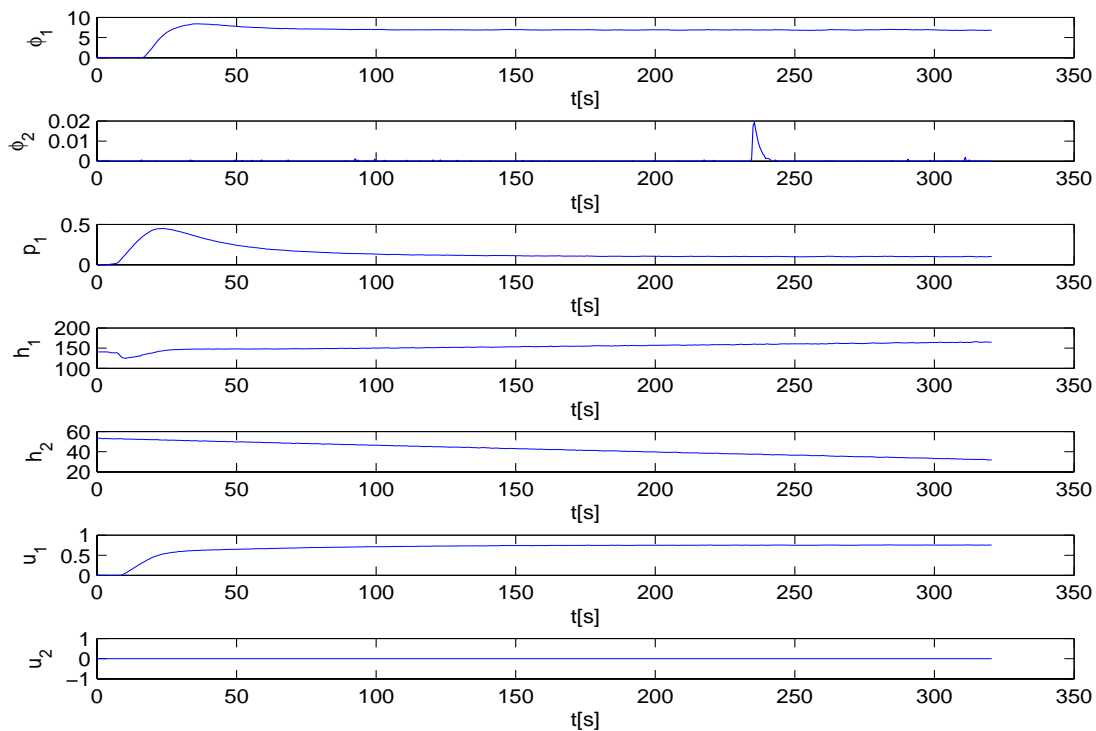
Slika 60 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



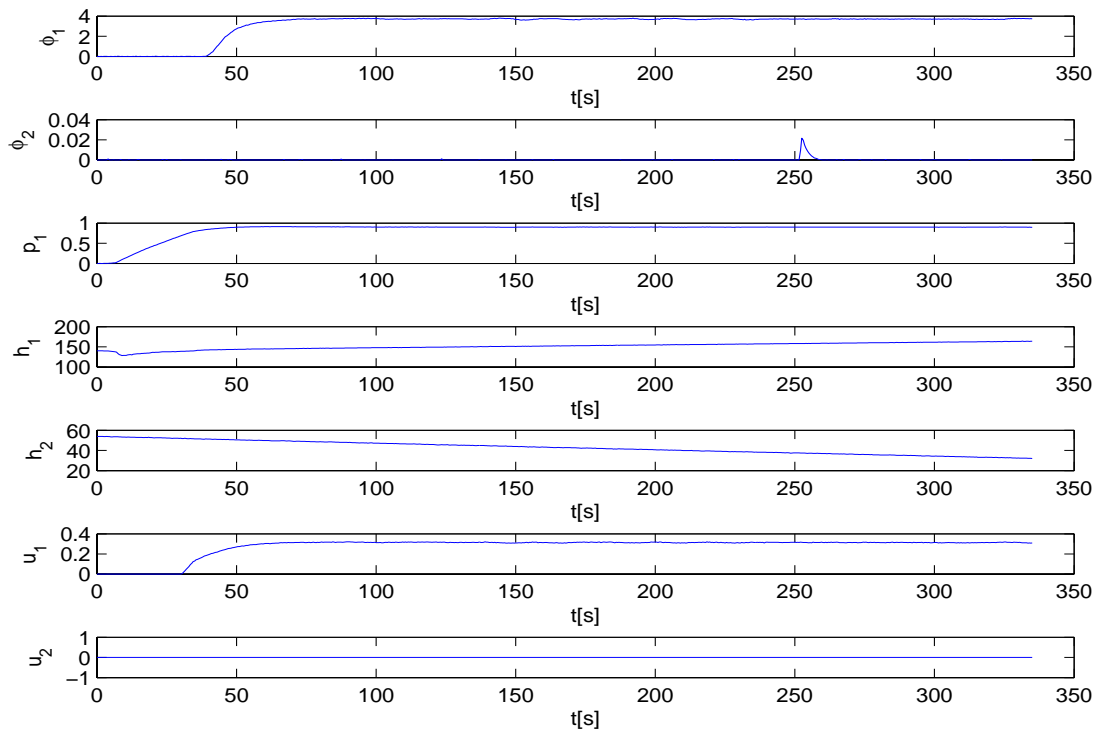
Slika 61 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54 \text{ Hz}$.



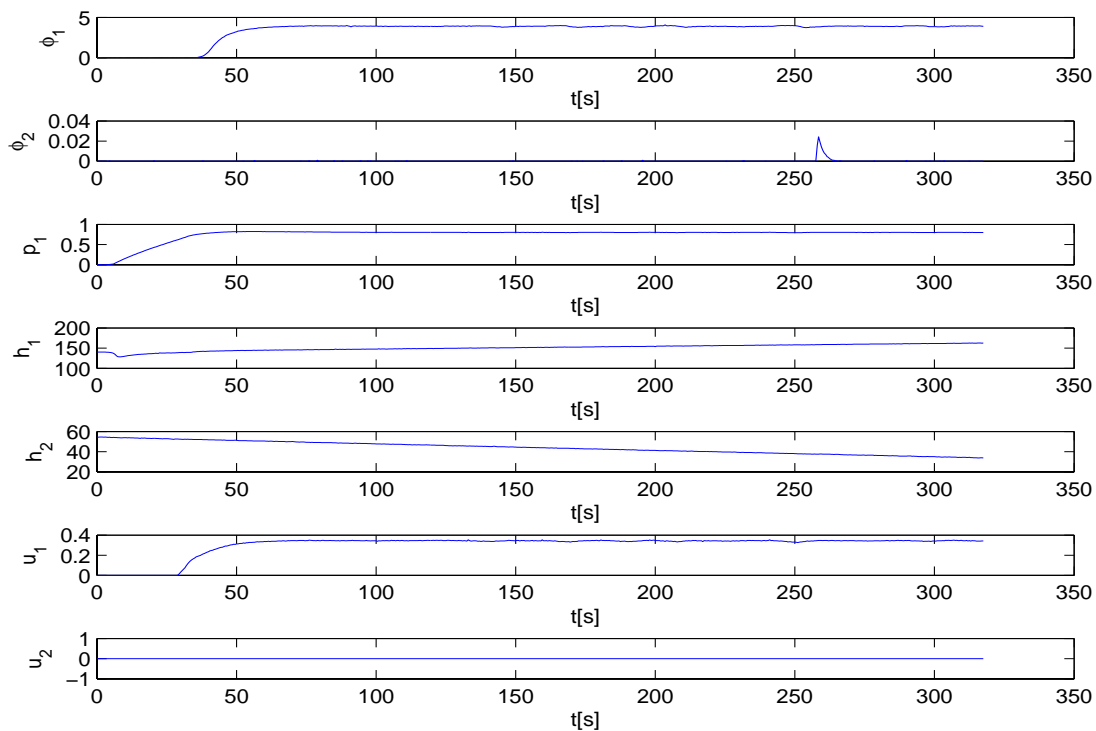
Slika 62 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54 \text{ Hz}$.



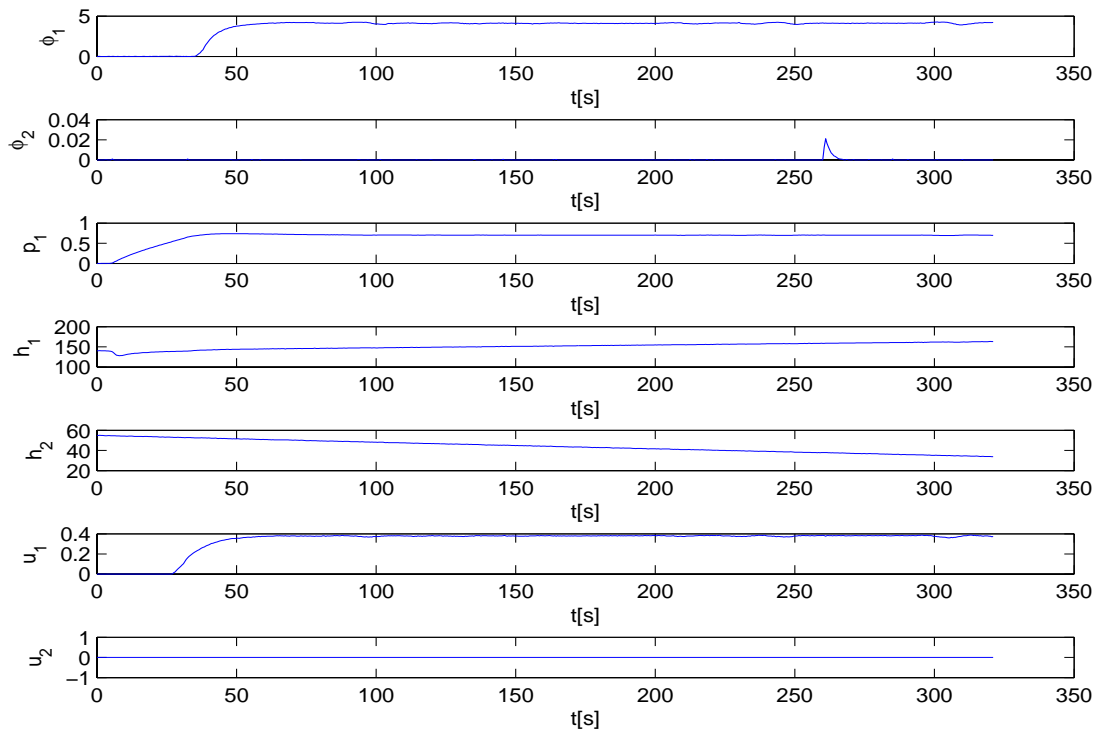
Slika 63 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 54\text{Hz}$.



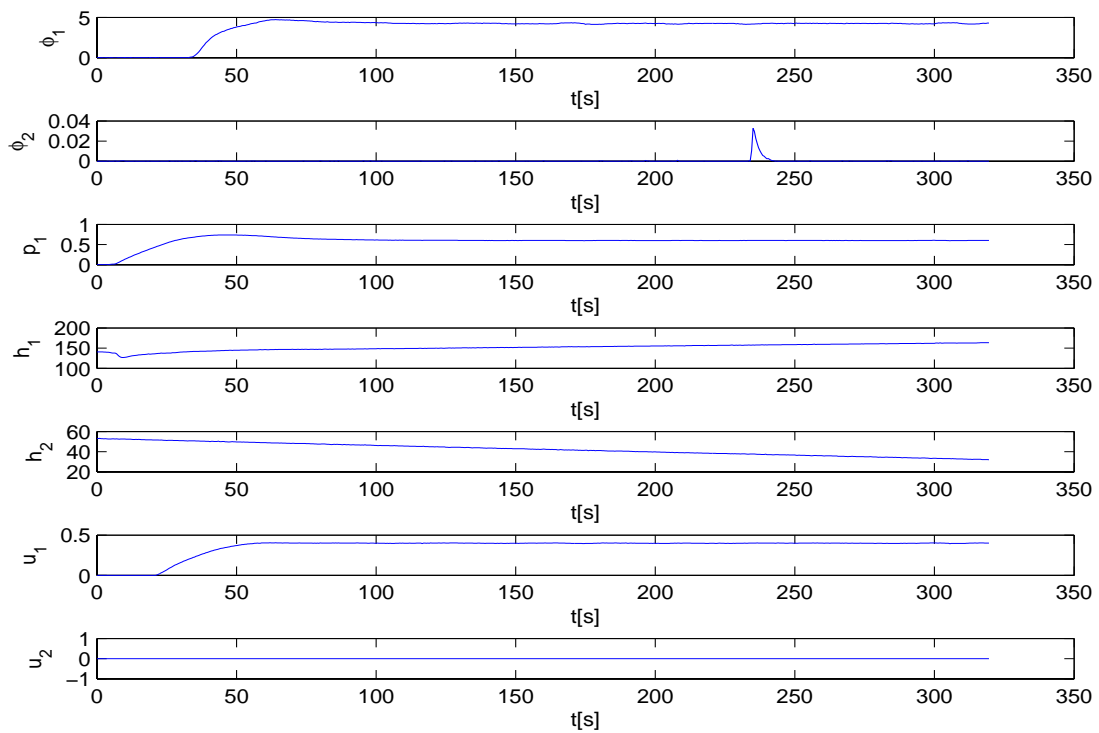
Slika 64 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



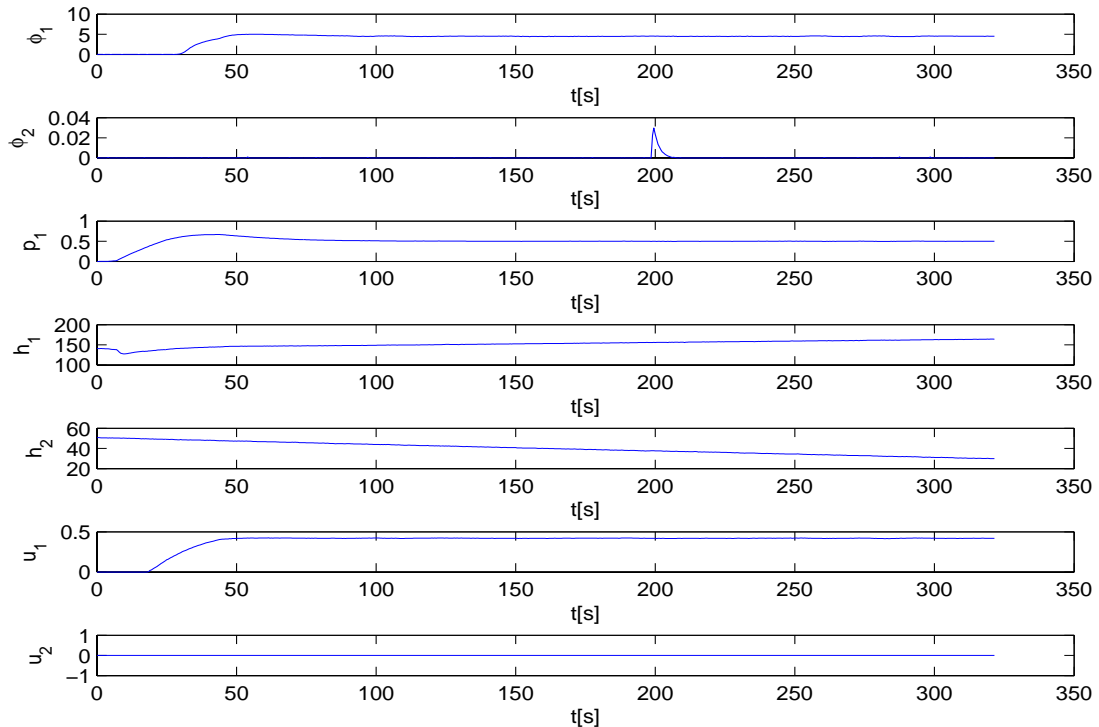
Slika 65 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



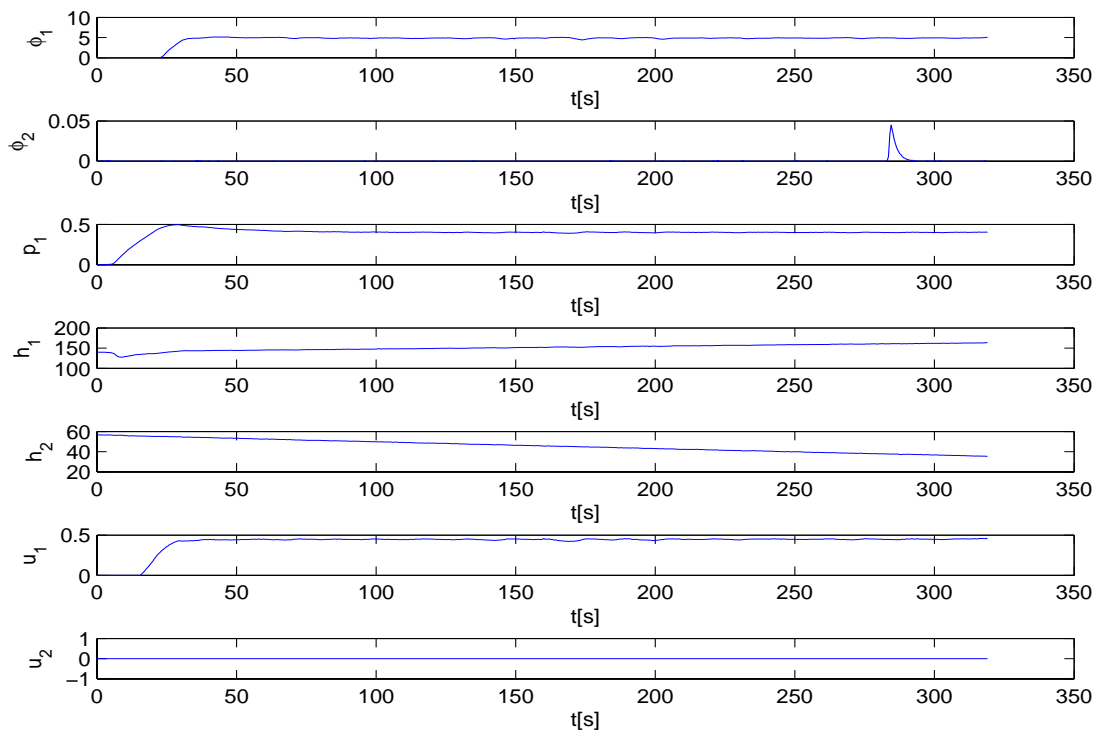
Slika 66 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



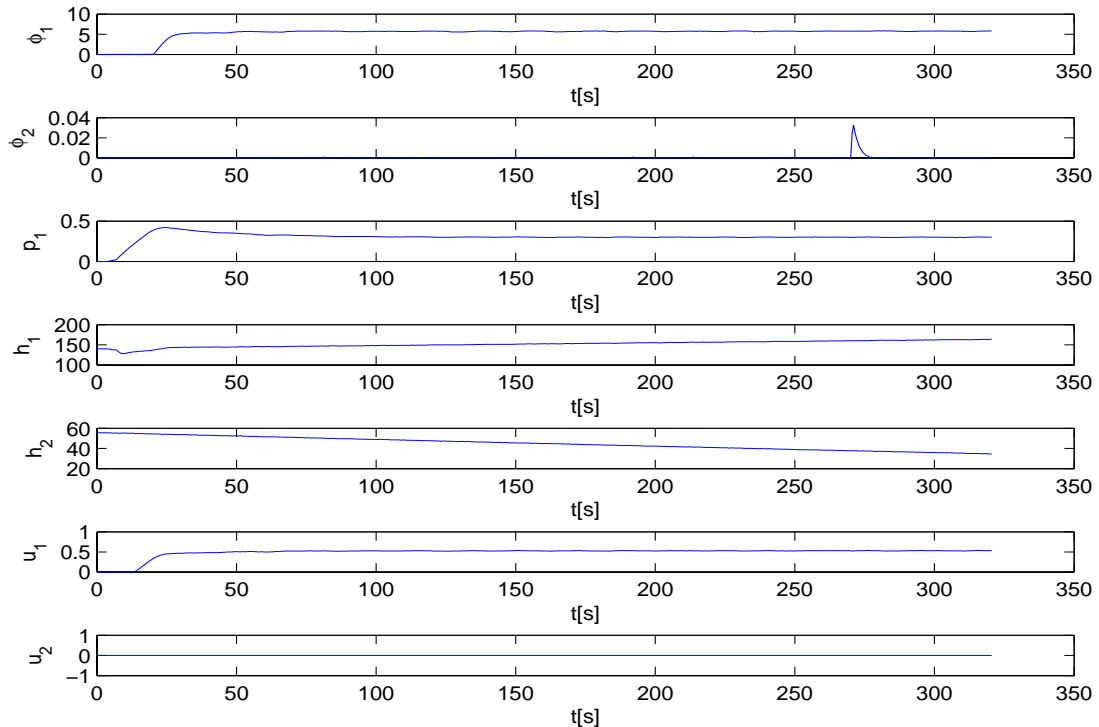
Slika 67 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



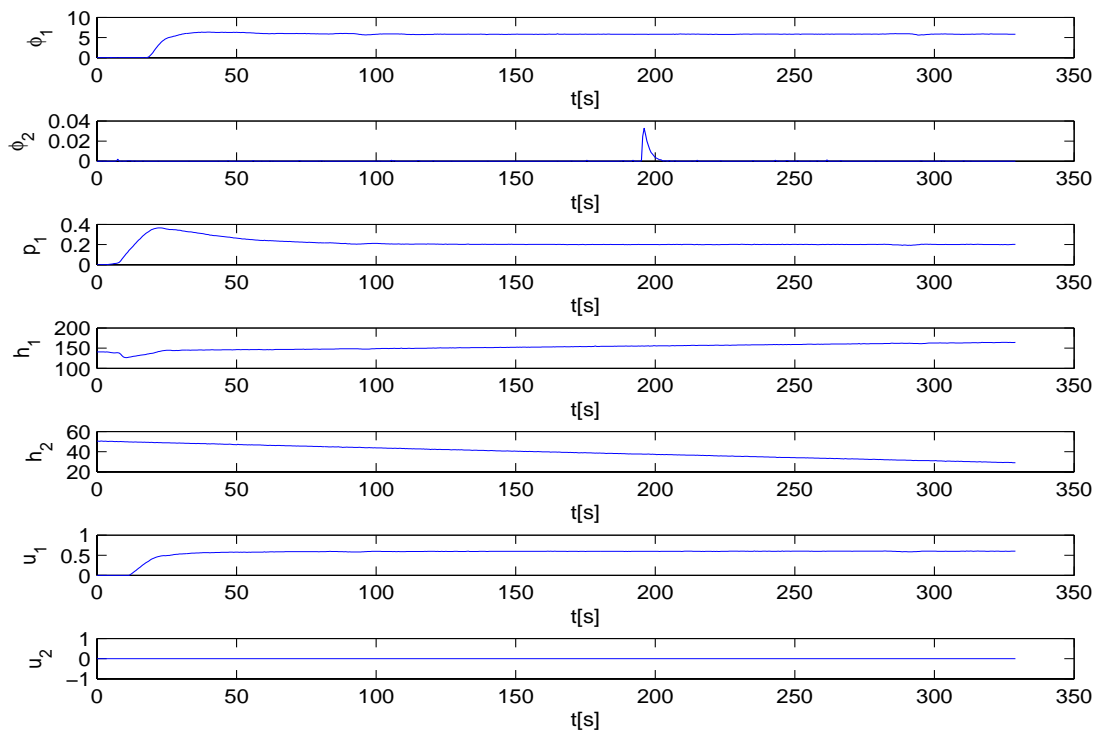
Slika 68 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



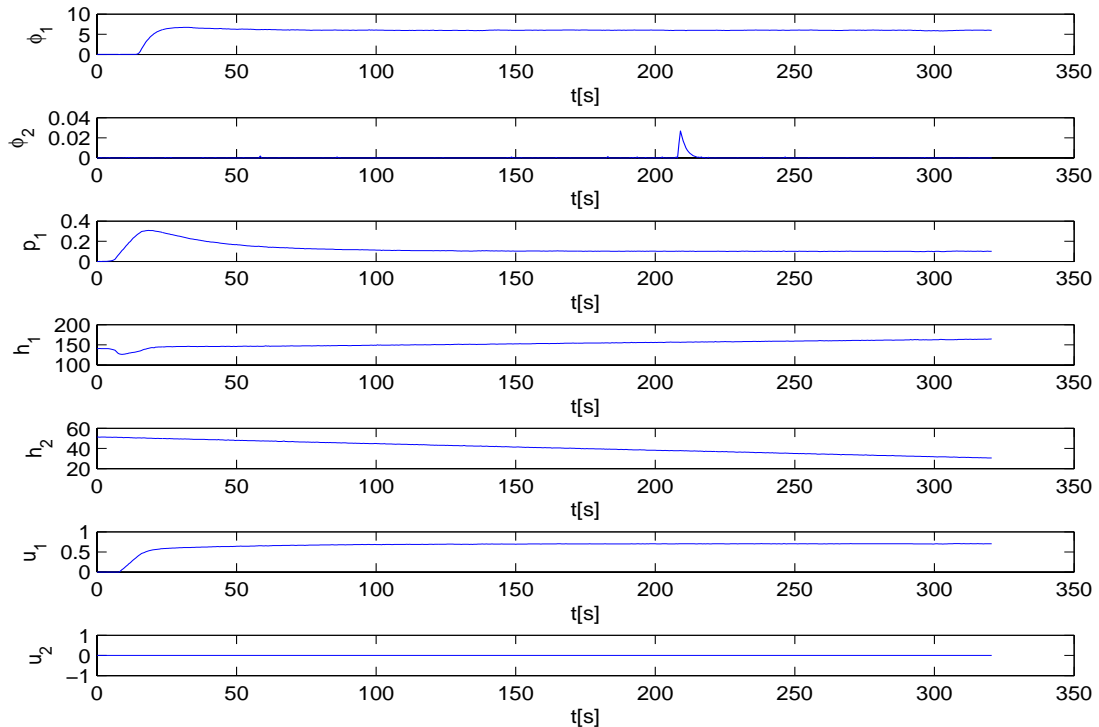
Slika 69 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



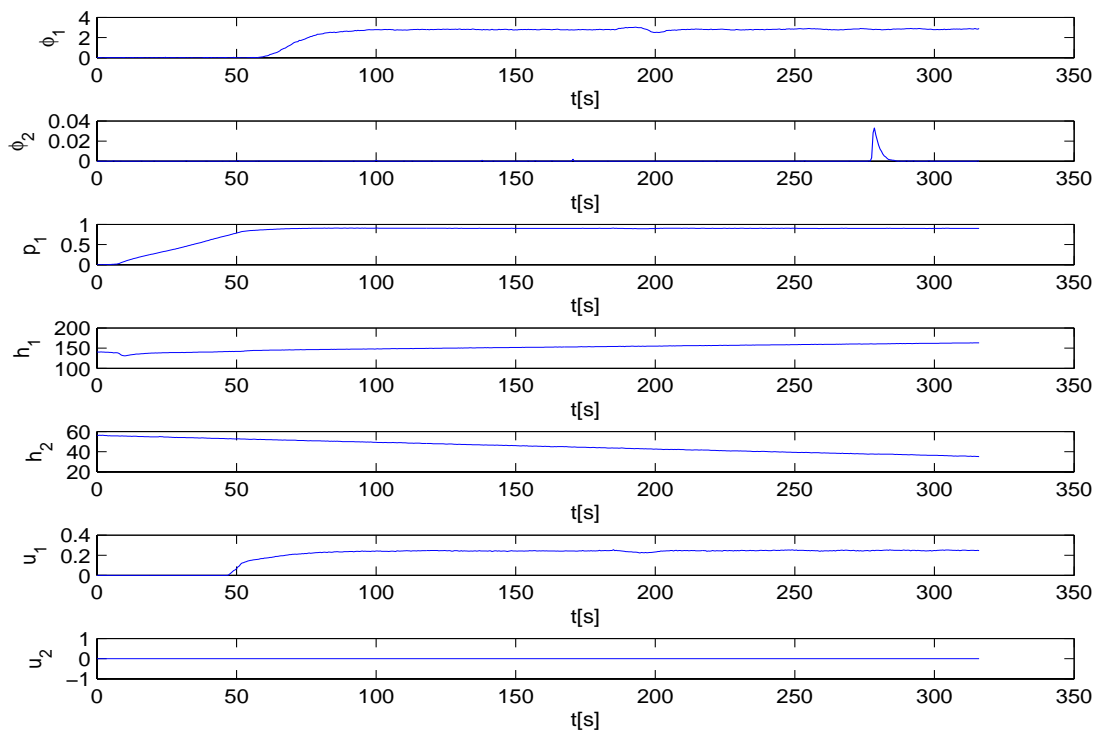
Slika 70 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



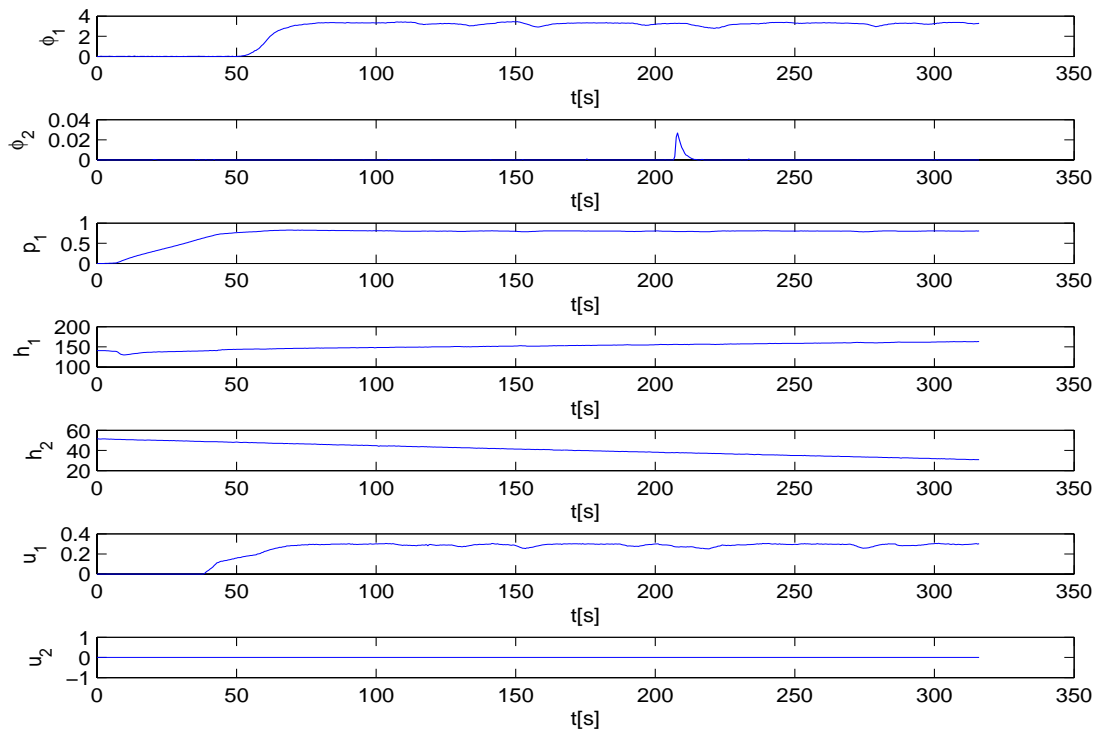
Slika 71 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



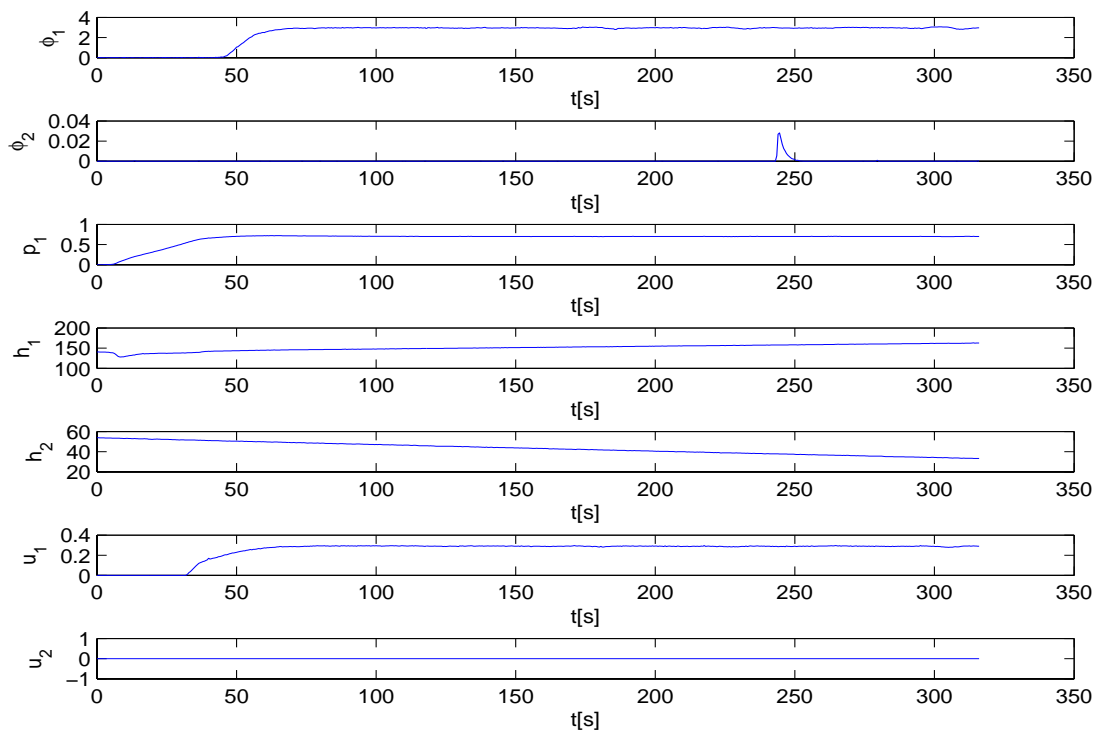
Slika 72 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 48\text{Hz}$.



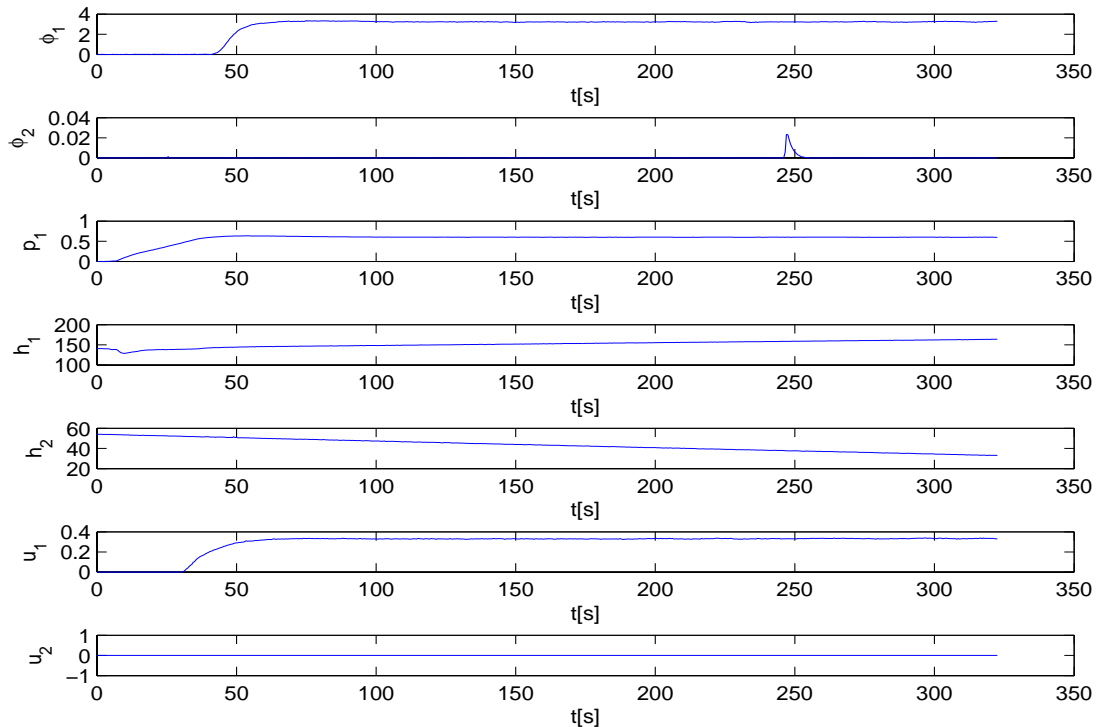
Slika 73 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



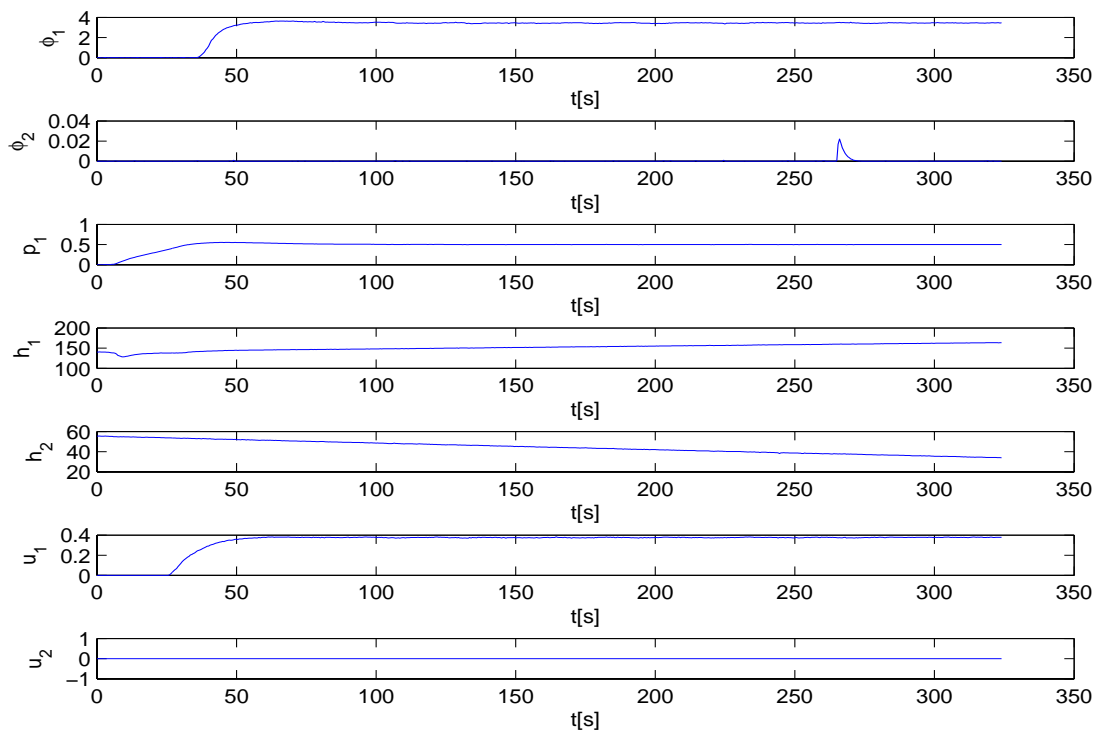
Slika 74 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



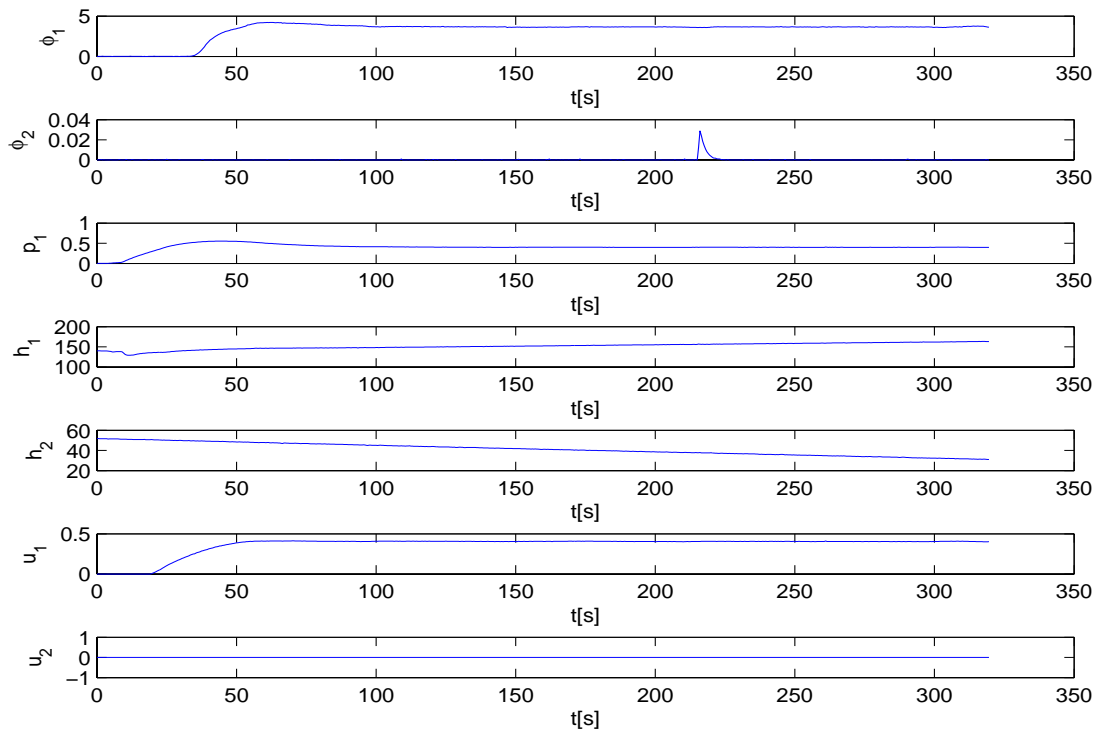
Slika 75 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



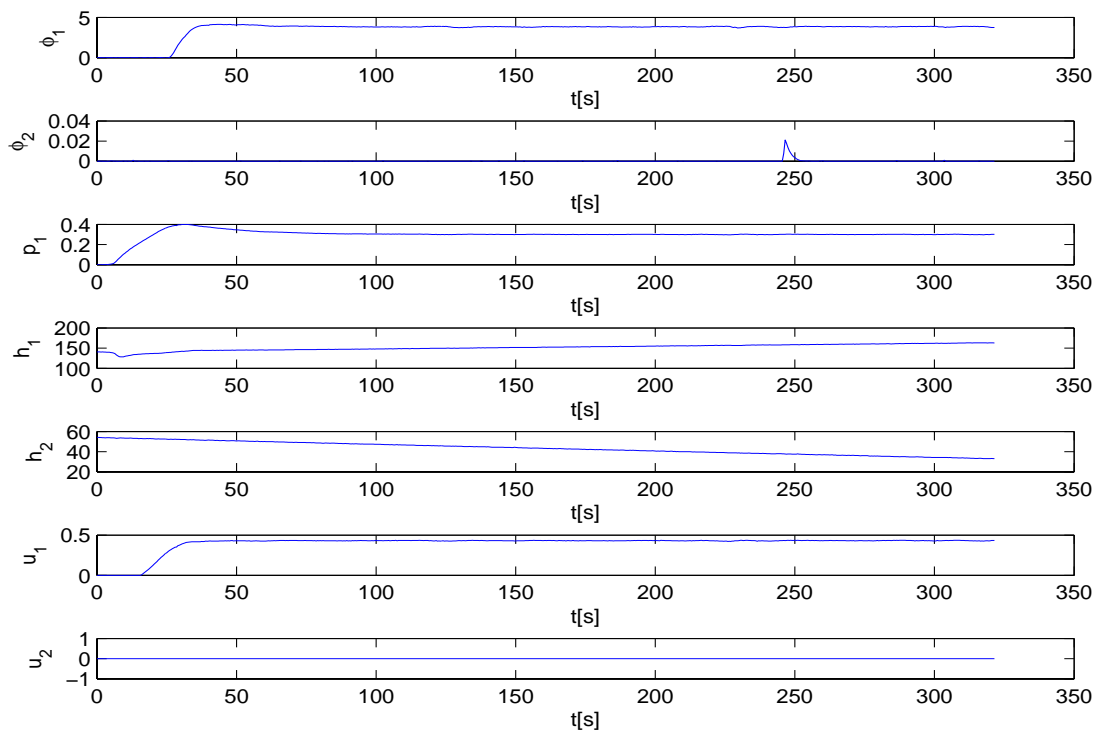
Slika 76 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



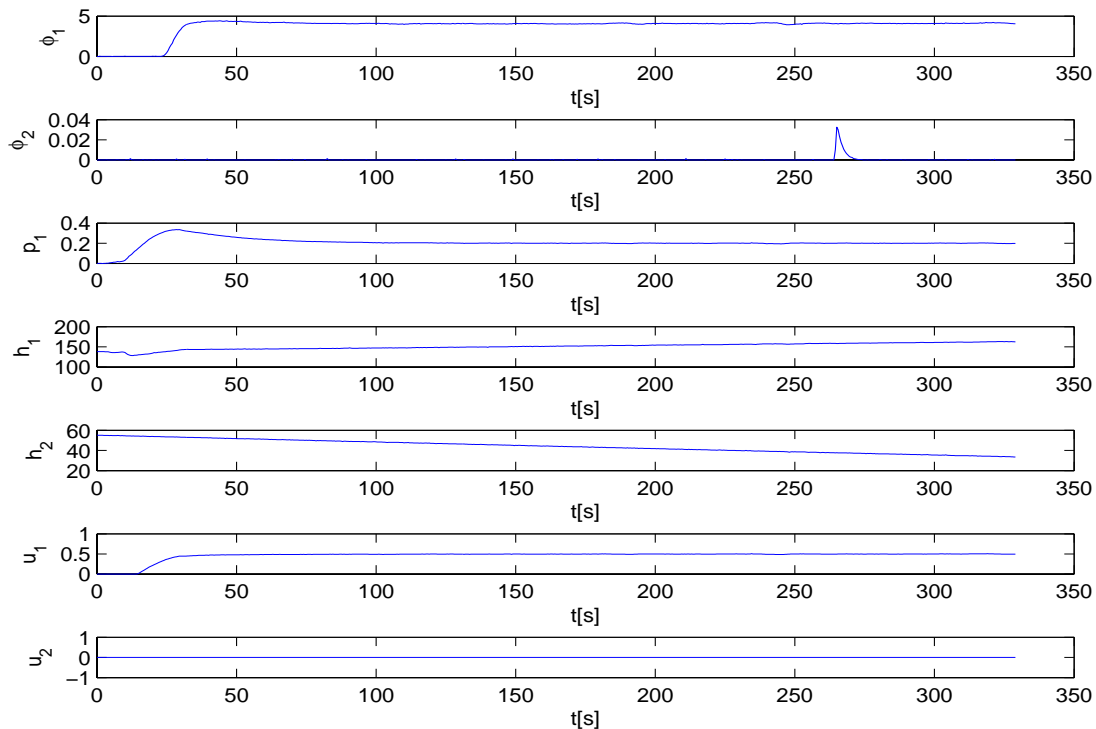
Slika 77 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



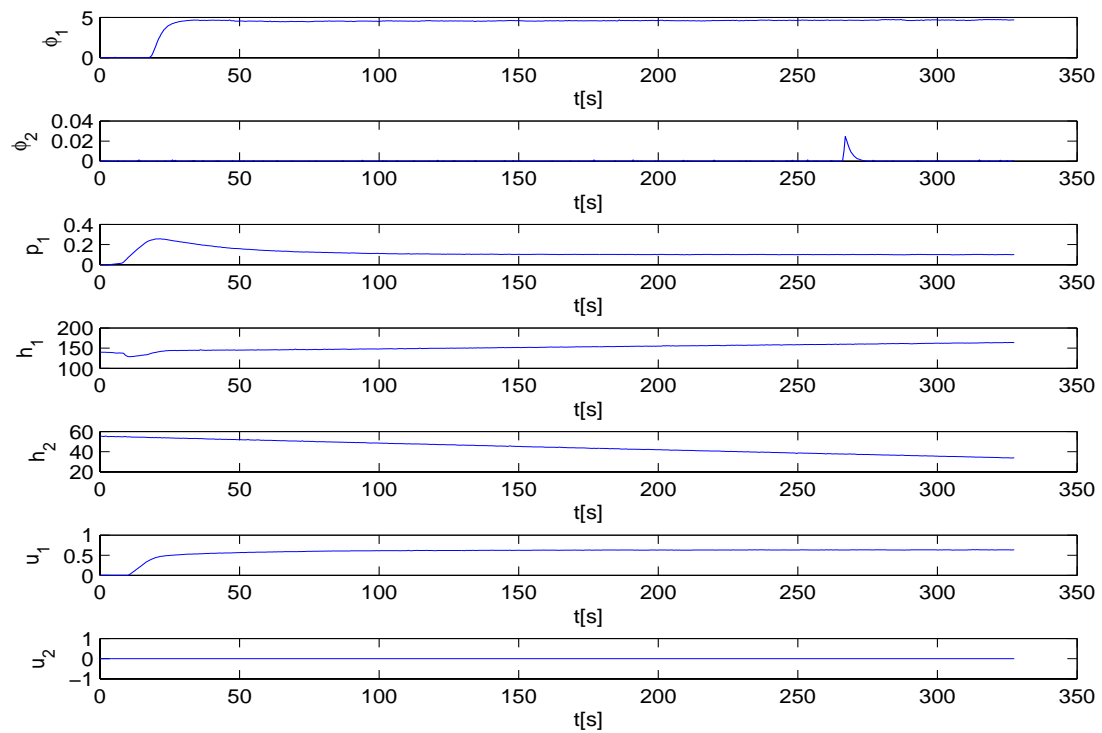
Slika 78 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



Slika 79 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



Slika 80 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.



Slika 81 Na grafu si od zgoraj navzdol sledijo naslednje veličine: pretok zraka skozi V_1 , pretok vode skozi V_2 , tlak p_1 v ločevalniku, nivo v ločevalniku, nivo v rezervoarju, komandni signal u_1 ter komandni signal u_2 . Hitrost črpalke je bila $f = 42\text{Hz}$.